



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TL 141584

ANALISIS PENGARUH VARIASI WAKTU TAHAN DAN TEMPERATUR *TEMPERING* TERHADAP SIFAT KEKERASAN MATERIAL *CROSSBAR* YANG DI *HARDENING* SEBAGAI SOLUSI KEGAGALAN PADA *CROSSBAR*

DONY PRASETYA
NRP. 2713 100 093

Dosen Pembimbing
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Alvian Toto Wibisono, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017



TUGAS AKHIR - TL141584

**ANALISIS PENGARUH VARIASI WAKTU
TAHAN DAN TEMPERATUR *TEMPERING*
TERHADAP SIFAT KEKERASAN MATERIAL
CROSSBAR YANG DI *HARDENING* SEBAGAI
SOLUSI KEGAGALAN PADA *CROSSBAR***

DONY PRASETYA
NRP. 2713 100 093

Dosen Pembimbing :
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc
Alvian Toto Wibisono, ST., MT

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

ANALYSIS THE EFFECT OF TEMPERING HOLDING TIME AND TEMPERING TEMPERATURE VARIATION ON HARDNESS PROPERTIES OF HARDENED CROSSBAR MATERIAL AS THE SOLUTION OF CROSSBAR FAILURE

DONY PRASETYA
NRP. 2713 100 093

Advisor:

Ir. Rochman Rochiem, M.Sc

Alvian Toto Wibisono, ST., MT

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2017

(This page is left intentionally blank)

**ANALISIS PENGARUH VARIASI WAKTU TAHAN
DAN TEMPERATUR *TEMPERING* TERHADAP
SIFAT KEKERASAN MATERIAL *CROSSBAR* YANG
DI *HARDENING* SEBAGAI SOLUSI KEGAGALAN
PADA *CROSSBAR***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Mmeperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Korosi dan Analisa Kegagalan
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Dony Prasetya
NRP. 2713 100 093

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Rochman Rochiem., M.Sc.
2. Alvian Toto Wibisono ST, MT

 (Pembimbing I)
 (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**Analisis Pengaruh Variasi Waktu Tahan dan Temperatur
Tempering terhadap Sifat Kekerasan Material *Crossbar*
yang Di *Hardening* sebagai Solusi Kegagalan pada *Crossbar***

Nama : Dony Prasetya
NRP : 2713 100 093
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Ir. Rochman Rochiem., M.Sc.
Alvian Toto Wibisono, ST., MT

Abstrak

Clinker cooler adalah alat yang berfungsi mentransportasikan *clinker* menuju *hammer crusher*. Salah satu bagian dari *clinker cooler* adalah *crossbar*. *Crossbar* sering mengalami crack sehingga mengurangi umur pakai dari *clinker cooler*. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis kegagalan dari *crossbar* dan solusi dari kegagalan tersebut berupa *hardening* dan *tempering*. Pengujian yang dilakukan untuk menganalisis material ini adalah uji komposisi, uji streomikroskop, uji SEM, metalografi, dan uji kekerasan Berdasarkan pengujian OES dan kekerasan, faktor yang kegagalan adalah kesalahan dalam pemilihan material yang ditinjau dari komposisi material, kekerasan material. Solusi dari kegagalan ini yaitu perlakuan panas yang dapat menghasilkan kekerasan yang sesuai dengan standar kekerasan ASTM A48 adalah *hardening* dan *tempering* 300°C dengan waktu tahan 120 menit, *hardening* dan *tempering* 350°C dengan waktu tahan 120 menit, *hardening* dan *tempering* 400°C dengan waktu tahan 120 menit, dan *hardening* dan *tempering* 300°C dengan waktu tahan 60 menit.

Kata kunci: *Crossbar, Crack, Hardening, Tempering, ASTM A48*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Analysis The Effect of Tempering Holding Time and Tempering Temperature Variation on Hardness Properties of Hardened Crossbar Material as The Solution of Crossbar Failure

Name : Dony Prasetya
SRN : 2713 100 093
Major : Materials and Metallurgical Engineering
Advisor : Ir. Rochman Rochiem., M.Sc.
Alvian Toto Wibisono ST., MT

Abstract

Clinker cooler is an equipment that has function to move clinker to hammer crusher. One of the clinker cooler's part is crossbar. Crossbar often have a failure in form of crack and decrease the lifetime of clinker cooler. This study content of failure analysis and how to solve the failure by hardening and tempering. To analize the failure, researcher do some examination such as element content analysis, stereomicroscope observation, SEM, metallography, dan hardness test. According to element content analysis and hardness test, cause of the failure is wrong material selection based on content of the material and the hardness of material. The solution of the failure is heat treatment that can hardened the material according to the hardness standard ASTM A48. The type of heat treatments are hardening and tempering 300°C with holding time 120 minutes, hardening and tempering 350°C with holding time 120 minutes, hardening and tempering 400°C with holding time 120 minutes, dan hardening dan tempering 300°C with holding time 60 minutes.

Keyword: Crossbar, Crack, Hardening, Tempering, ASTM A48

(This page is left intentionally blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat, anugerah, serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir serta menyusun laporan Tugas Akhir dengan judul “**Analisis Pengaruh Variasi Waktu Tahan dan Temperatur *Tempering* terhadap Sifat Kekerasan Material *Crossbar* Yang di *Hardening* sebagai Solusi Kegagalan pada *Crossbar***”. Laporan tugas akhir ini dibuat untuk melengkapi Mata Kuliah Tugas Akhir yang menjadi salah satu syarat kelulusan mahasiswa di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, laporan tugas akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan kesempatan kepada penulis hingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan, diantaranya:

1. Kedua orang tua dan keluarga yang telah memberikan banyak doa, dukungan, semangat, cinta kasih, motivasi, dan inspirasi.
2. Ir. Rochman Rochiem., M.Sc. dan Alvian Toto Wibisono ST., MT. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
3. Dr. Agung Purniawan, ST., M,Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
4. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
5. Dian Mughni Fellicia ST., M.Sc selaku dosen wali yang sangat mengayomi selama penulis menjalani pendidikan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.

6. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang telah membimbing penulis hingga terciptanya laporan ini.
7. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi.
8. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang membaca. Penulis juga menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini, sehingga penulis sangat menerima kritik dan saran dari para pembaca yang dapat membangun demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini.

Surabaya, 09 Januari 2017
Penulis,

Dony Prasetya
2713100093

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Permasalahan.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Pengertian Clinker Cooler	5
2.2 Pengertian Crossbar.....	7
2.3 Material Crossbar (ASTM A48)	8
2.4 Baja AISI D2	9
2.5 Analisa Kegagalan.....	12
2.6 Diagram Fase Fe – 12% & 18% wt Cr – C	13
2.7 Baja Paduan.....	13
2.7.1 Baja Paduan Tinggi (High Alloy Steel)	14
2.7.2 Pengaruh terhadap diagram fasa	14
2.8 Analisa Kegagalan.....	16
2.9 Prosedur Dalam Analisa Kegagalan	18
2.10 Patah Getas dan Patah Ulet.....	19
2.10.1 Patahan Ulet.....	20
2.11 Mekanisme Pembentukan Patah Lelah	23
2.11.1 Tahap Retak Awal (<i>Crack Initiation</i>)	24
2.11.2 Tahap Perambatan Retak (<i>Crack Propagation</i>)	25
2.12 Karakteristik Patahan	25
2.13 <i>Heat Treatment</i>	27

2.13.1 <i>Hardening</i>	28
2.13.2 Austenitisasi.....	29
2.13.3 <i>Cooling</i>	30
2.13.4 Tempering.....	31
2.13.5 Tempering pada Martensite	35
2.14 Pengujian Kekerasan	36
2.14.1. Uji Kekerasan Brinnel	37
BAB III METODOLOGI	
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	39
3.2 Metode Penelitian.....	40
3.3 Material yang Digunakan	40
3.4 Peralatan.....	41
3.5 Tahapan Penelitian	43
3.5.1 Review Dokumen Perusahaan	43
3.5.2 Preparasi Spesimen	44
3.5.3 Proses Perlakuan Panas.....	44
3.5.4 Uji Komposisi.....	44
3.5.5 Pengamatan Makroskopik.....	45
3.5.6 Pengamatan Mikroskopik	45
3.5.7 Uji Kekerasan	46
3.6 Rancangan Penelitian	48
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Analisis Data Kegagalan pada Material <i>Crossbar</i>	49
4.1.1 Record Crossbar KJ210 di <i>Clinker Cooler</i>	49
4.1.2 Uji Komposisi Unsur	50
4.1.3 Pengamatan Makroskopik.....	51
4.1.4 Hasil Streomicroscope pada <i>Crossbar</i> yang Gagal	53
4.1.5 Hasil Pengujian SEM (<i>Scanning Electron Microscope</i>) pada <i>Crossbar</i> yang Gagal.....	54
4.1.6 Hasil Pengamatan Struktur Mikro (Metalografi)	57
4.1.7 Hasil Pengujian Kekerasan Brinnel Material yang Gagal	58
4.2 Analisis Data Material <i>Crossbar</i> setelah <i>Heat Treatment</i>	62
4.2.1 Hasil Uji Metalografi	63

4.2.2 Hasil Uji Kekerasan Material Crossbar Setelah Diberi Perlakuan Panas.....	65
4.3 Pembahasan.....	67
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	71
5.2 Saran	72
DAFTAR PUSTAKA	xxiii
LAMPIRAN.....	xxv
BIODATA PENULIS	xxxvii

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Komponen utama <i>Clinker Cooler</i>	5
Gambar 2.2 Komponen <i>Cooler</i>	6
Gambar 2.3 <i>Crossbar</i>	7
Gambar 2.4 Grafik TTT baja AISI D2.....	9
Gambar 2.5 Struktur Mikro Baja AISI D2	10
Gambar 2.6 Diagram fase Fe - Fe ₃ C	11
Gambar 2.7 A) Diagram fase Baja Chrom pada 12% Cr dan (B) Diagram fase Baja Chrom pada 18% Cr	12
Gambar 2.8 Pengaruh unsur paduan terhadap temperatur eutectoid (kiri) dan kadar dalam eutectoid (kanan)	14
Gambar 2. 1 Pengaruh kadar chromium terhadap luasan daerah austenite	14
Gambar 2. 2 Skematik ciri patah getas dan patah ulet dari diagram tegangan-regangan	19
Gambar 2. 3 (a) bentuk patahan ulet, (b) bentuk patahan ulet setelah terjadi necking, (c) bentuk patahan getas tanpa terjadi deformasi plastis	20
Gambar 2. 4 Tahap patahan cup dan cone (a) awal necking, (b) terbentuknya <i>cavity</i> kecil, (c) pengumpulan <i>cavity</i> hingga menjadi retakan, (d) perambatan retak, (e) patahan geser dengan sudut 45° terhadap arah tegangan	20
Gambar 2. 5 (a) patah ulet (<i>cup and cone</i>) pada aluminium, dan (b)patah getas pada <i>mild steel</i>	21
Gambar 2. 6 (a) SEM yang menunjukkan spherical dimple karakteristik, patahan hasil beban tarik uniaxial, 3300□, dan (b) SEMyang menunjukkan spherical dimple karakteristik hasil beban geser, 5000x	22
Gambar 2. 7 Mekanisme patah lelah dan faktornya	22
Gambar 2. 8 Model Wood untuk pengintian retak	23
Gambar 2. 9 Mekanisme penumpulan ujung retakan secara plastis (a) beban nol (b) beban tarik kecil (c) beban tarik maksimum (d) beban-tekan kecil (e) beban tekan maksimum (f) beban tarik kecil	24

Gambar 2. 10 Foto SEM yang menunjukkan <i>Beachmarks</i> dan striasi secara mikro	25
Gambar 2. 11 Retakan dengan pola rambatan (a)Transgranular (b) Intergranular	26
Gambar 2. 12 Perlakuan panas Hardening-tempering pada baja	27
Gambar 2. 13 Rentang temperatur austenitisasi pada perlakuan panas	28
Gambar 2. 14 Tiga tahapan pada quenching	30
Gambar 2. 15 Skema produk transformasi austenit pada pendinginan dan transformasi martensit pada pemanasan (Tempering)	32
Gambar 2. 16 Hubungan temperatur tempering pada kekuatan luluh dan tarik dan keuletan (%RA) (pada temperatur kamar) untuk paduan baja 4340 oil quench	33
Gambar 2. 17 Perbedaan struktur mikro dari martensite, tempered martensite, dan heavily tempered	35
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	37
Gambar 3.2 a.) Komponen <i>cross bar</i> yang <i>crack</i> . b.).Bagian <i>cross bar</i> yang masih terpasang	39
Gambar 3.3 Mesin Wire Cut.....	39
Gambar 3.4 Mesin OES	40
Gambar 3.5 Universal Hardness Tester.....	40
Gambar 3.6 Olympus Optical Microscope.....	41
Gambar 3.7 Mesin SEM – EDX	41
Gambar 3.8 Siklus termal perlakuan panas pada penelitian	42
Gambar 3.9 (a) Kamera merk Nikon tipe SLR. (b)Stereomicroscope.....	43
Gambar 3.10 : Mesin SEM –EDAX FEI type Inspect S-50	44
Gambar 3.11 <i>Universal Hardness Tester HBRV 187.5A</i>	45
Gambar 4.1 Desain <i>crossbar</i> di PT. Semen Indonesia	48
Gambar 4.2 Retak (<i>crack</i>) yang terjadi pada <i>crossbar</i> PT Semen Indonesia Persero Tbk.	50
Gambar 4.3 (a) Retak pada <i>crossbar</i> (b) Permukaan patahan setelah dipotong	50

Gambar 4.4 Observasi visual bagian yang mengalami <i>crack</i> (a) potongan spesimen yang mengalami <i>crack</i> (b) <i>initial crack</i> (c) <i>propagation</i> (d) <i>final crack</i>	51
Gambar 4.5 Observasi SEM bagian yang mengalami <i>crack</i> (a) Potongan spesimen yang mengalami <i>crack</i> (b) <i>initial crack</i> (c) <i>propagation</i> (d) <i>final crack</i>	53
Gambar 4.6 Struktur mikro (a) Material <i>crossbar</i> dan (b) besi tuang kelabu	56
Gambar 4.7 <i>Crossbar</i> yang mengalami kegagalan.....	57
Gambar 4.8 (a) Daerah indentasi tegak lurus dekat dengan <i>crack</i> (b) Daerah indentasi sejajar dekat dengan <i>crack</i>	57
Gambar 4.9 (a) Daerah indentasi tegak lurus arah pendinginan (b) Daerah indentasi sejajar arah pendinginan	58
Gambar 4.10 Struktur mikro spesimen (a) H (b) HT250t60 (c) HT300t60 (d) HT350t60 (e) HT400t60	61
Gambar 4.11 Struktur mikro spesimen (a) H (b) HT250t120 (c) HT300t120 (d) HT350t120 (e) HT400t120	62
Gambar 4.12 Grafik hasil uji kekerasan material <i>crossbar</i> setelah diberi perlakuan panas.....	64
Gambar 4.13 Ilustrasi persebaran gaya pada sayap <i>crossbar</i> (a) Pada saat mendorong <i>clinker</i> (b) Pada saat kembali ke posisi semula	69

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia pada ASTM A48	7
Tabel 2.2 Sifat mekanik pada ASTM A48	8
Tabel 2.3 Komposisi Kimia pada Baja AISI D2	8
Tabel 2.4 Hardness Baja AISI D2	9
Tabel 2.5 Perlakuan panas pada baja AISI D2	9
Tabel 2.6 Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin	15
Tabel 2.7 Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin	16
Tabel 2.8 Penyebab kegagalan dalam komponen mesin	17
Tabel 3.1 Komposisi Kimia <i>Crossbar</i>	39
Tabel 3.2 Rancangan Penelitian	46
Tabel 4.1 Data Operasi <i>crossbar</i> di <i>clinker cooler</i> Tuban 3 PT. Semen Indonesia	47
Tabel 4.2 Perbandingan hasil uji komposisi unsur dari spesimen <i>crossbar</i> dengan komposisi unsur ASTM A48	49
Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian Kekerasan Dekat dari <i>crack</i>	59
Tabel 4.4. Data Hasil Pengujian Kekerasan Jauh dari <i>crack</i>	59
Tabel 4.5 Kekerasan besi tuang kelabu menurut ASTM A48	59
Tabel 4.6 Kode Penamaan Spesimen	60
Tabel 4.7 Hasil uji kekerasan material <i>crossbar</i> setelah diberi perlakuan panas	64

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT. Semen Indonesia merupakan produsen semen terbesar di Indonesia. Keberhasilan pembangunan pabrik Tuban IV dan Tonasa V, serta akuisisi perusahaan semen Vietnam Thang Long Cement Company pada akhir tahun 2013, maka pada awal tahun 2013 perseroan memiliki kapasitas terpasang sebesar 30 ton/tahun dan telah menjadi perusahaan semen terbesar di Asia Tenggara berdasarkan kapasitas terpasang. Proses pembuatan semen PT. Semen Indonesia unit Tuban 3 secara garis besar melalui proses dengan dimulai dari pengambilan bahan baku, proses pembuatan klinker, proses penggilingan semen dan *packing* semen. Dalam proses produksi semen ini, terdapat banyak *equipment* yang digunakan dan salah satunya adalah *clinker cooler*. (Ibrahim,2004)

Mesin pendingin terak (*clinker cooler*) berfungsi sebagai pendingin terak (*clinker*) yang keluar dari mesin pemanas (*kiln*). *Clinker* yang keluar dari *kiln* akan dihantarkan menuju mesin penggiling (*hammer crusher*) melalui papan silang (*crossbar*) yang berjajar diatas bagian *cooler*. Maka dari itu, dibutuhkan sifat kekerasan dan ketangguhan yang tinggi untuk komponen *crossbar*. Pada tanggal 21 Juli 2016, *crossbar* pada *clinker cooler* mengalami banyak retakan (*crack*). Komponen *crossbar* mengalami kegagalan berupa *crack* yang diakibatkan oleh beban yang terlalu besar dan kerja yang terus menerus. Material standar untuk *crossbar* adalah baja tuang kelabu (*grey cast iron*). Akan tetapi setelah diuji komposisi, *crossbar* yang digunakan di PT Semen Indonesia adalah baja karbon tinggi krom tinggi Berdasarkan jenis kegagalan yang terjadi, maka dibutuhkan peningkatan sifat kekerasan dan ketangguhan pada material tersebut. Untuk meningkatkan sifat- sifat tersebut maka material AISI D2 tersebut akan diberi perlakuan *hardening*. Setelah di *hardening*, material tersebut akan di *tempering* dengan 2 variabel



waktu tahan yang berbeda dan 4 variabel temperatur yang berbeda. *Tempering* bertujuan agar material yang di *hardening* tidak terlalu getas. Karena jika terlalu getas, maka akan terjadi *crack* ketika *crossbar* tersebut beroperasi. Setelah diberi perlakuan, akan dilakukan uji kekerasan, uji struktur mikro menggunakan mikroskop stereo dan uji fraktografi menggunakan SEM. Dari penelitian ini diharapkan dapat mengetahui temperatur dan *holding time tempering* yang tepat untuk material *crossbar* sebagai solusi permasalahan kegagalan komponen *crossbar* pada *clinker cooler*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Apa faktor penyebab terjadinya kegagalan pada komponen *crossbar* di *clinker cooler*?
2. Bagaimana mekanisme kegagalan pada komponen *crossbar* di *clinker cooler*?
3. Bagaimana pengaruh waktu tahan dan temperatur *tempering* pada material *crossbar* yang telah di *hardening* sebagai solusi kegagalan pada *crossbar* di *clinker cooler*?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisis permasalahan, maka dilakukan pembatasan permasalahan sebagai berikut :

1. Data operasi seperti temperatur, kecepatan gerak pada *crossbar* sudah memenuhi standar operasional.
2. Desain *crossbar* memenuhi standar operasional.
3. Pengaruh lingkungan diabaikan.
4. Material dianggap homogen di semua sisi
5. Diasumsikan tidak ada penurunan temperatur saat material uji keluar dari dapur pemanas.
6. Lama waktu pemindahan spesimen uji dari dapur ke media pendingin diasumsikan konstan pada semua spesimen uji.

BAB I PENDAHULUAN



1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Menganalisis faktor penyebab terjadinya kegagalan pada komponen *crossbar* di *clinker cooler*.
2. Menganalisis mekanisme kegagalan pada komponen *crossbar* di *clinker cooler*.
3. Menganalisis pengaruh waktu tahan dan temperatur *tempering* pada material *crossbar* yang telah di *hardening* sebagai solusi kegagalan pada *crossbar* di *clinker cooler*.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan penanganan bila terjadi kegagalan dikemudian hari dan dasar pengembangan pada ilmu berikutnya.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN



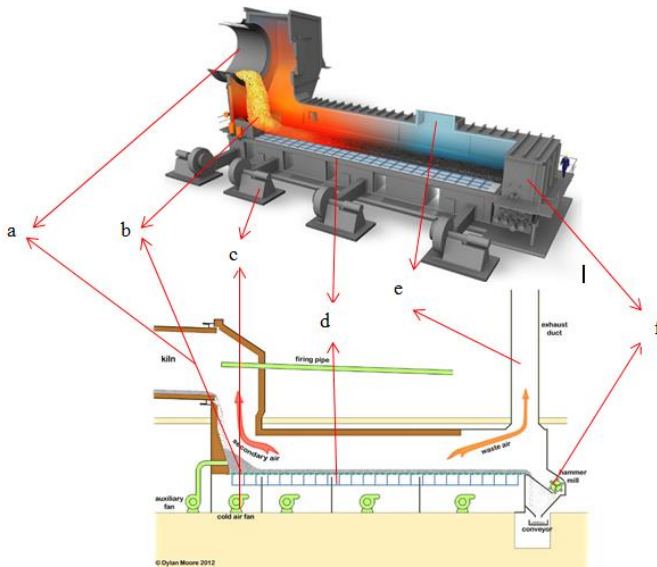
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian *Clinker Cooler*

Pada industri semen, terak (*clinker*) yang sudah diproses dari awal sampai dipanaskan pada mesin pemanas (*rotary kiln*) dengan temperatur $\pm 1800^{\circ}\text{C}$ selanjutnya akan diturunkan dari temperatur $\pm 1450^{\circ}\text{C}$ sampai *clinker* dengan temperatur $\pm 100\div 250^{\circ}\text{C}$ untuk selanjutnya akan dihancurkan oleh mesin penggiling (*hammer crusher*).

Pada Gambar 2.1 dijelaskan komponen – komponen pada *clinker cooler*. Proses pendinginan dimulai ketika (b) *clinker* keluar dari (a) *rotary kiln*. Selanjutnya *clinker* dihantarkan menuju ke (f) *hammer crusher* melalui (d) *crossbar* yang berjajar diatas bagian *cooler*. Bagian *cooler* terdiri atas (c) kipas (*fan*) yang memiliki fungsi sebagai pendingin. Udara yang digunakan untuk mendinginkan dibuang melalui (e) pipa pembuangan (*exhaust duct*).

Pada *clinker cooler* proses pendinginan *clinker* dilakukan dengan mengalirkan udara dari sejumlah *fan*, yang selanjutnya dihembuskan melalui papan silang (*crossbar*) yang bergerak mengantarkan *clinker* menuju ke *hammer crusher*. Untuk keperluan pendinginan tersebut digunakan alat yang disebut *grate cooler*. Pada *grate cooler* proses pendinginan *clinker* dilakukan dengan mengalirkan udara dari sejumlah *fan*, yang selanjutnya dihembuskan melalui celah – celah landasan (*grate*) yang bergerak mengantarkan *clinker* menuju ke grinder untuk proses selanjutnya *crusher* untuk proses selanjutnya. (Anwar, 2011)

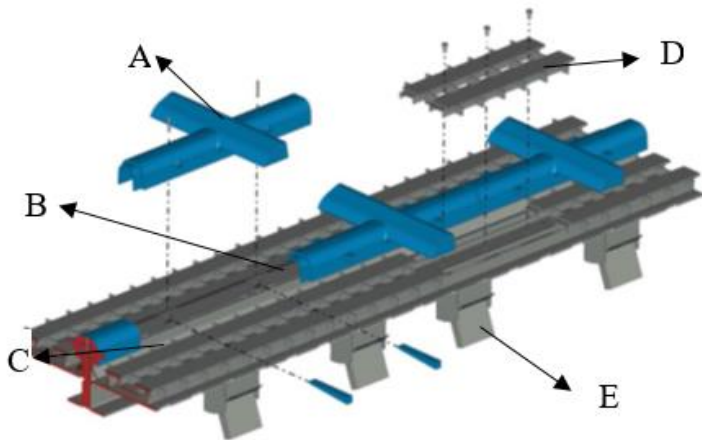


Gambar 2.1 Komponen utama *Clinker Cooler* (FLSmidth, 2016)

Kapasitas desain clinker cooler adalah 7800 ton / hari sedangkan luas permukaan efektifnya adalah 160.6 m², terdapat 3 section pada clinker cooler antara lain inlet, existing, dan extended. (Firdaus, 2007)

Proses pendinginan *clinker* di dalam *clinker cooler* merupakan salah satu proses yang cukup penting mendapat perhatian dalam produksi semen. Hal ini disebabkan karena proses pendinginan *clinker* setelah melewati pemanasan di dalam *rotary kiln*, merupakan salah satu faktor dalam upaya menghasilkan *clinker* dengan kualitas yang diharapkan (Silika ratio:2.44, Alumina ratio:1.54, *Lime saturation*: 96.2). (Anwar, 2011)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Gambar 2. 1 Komponen *Cooler* (FLSmidth Komponen, 2016)

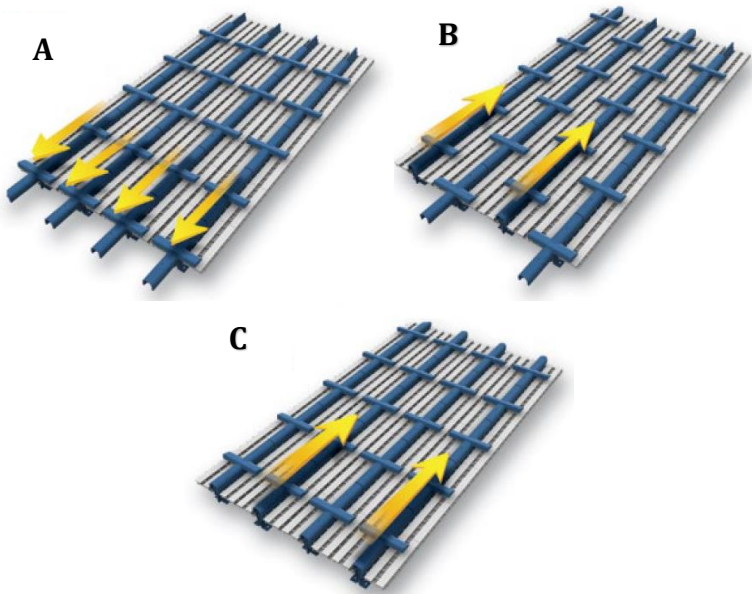
Secara umum komponen *cooler* (Gambar 2.2) dapat dibedakan menjadi 3 bagian utama yaitu : *cooling chamber*, *cooler drive*, dan *cooler hammer*. *Cooling chamber* berfungsi sebagai tempat terjadinya pendinginan *clinker* seperti komponen *crossbar* (A), *air distribution plate* (D), *mechanical flow regulator* (E). *Cooler drive* terdiri atas *drive plate* (B) dan *actuator* (C) yang berfungsi untuk alat transport *clinker* menuju ke *cooler hammer* sebelum diproses untuk menjadi bahan baku pembuat semen.

2.2. Pengertian *Crossbar*

Crossbar (Gambar 2.3) merupakan bagian dari *cooler* yang kontak langsung dengan *clinker*. Material dari *crossbar* biasanya berupa *cast iron* atau *forged carbon steel* yang berfungsi sebagai media pendingin dan transport *clinker*. Mekanisme *crossbar cooler* dirancang secara optimal untuk efisiensi transportasi *clinker*. Setiap baris bergerak dalam frame pendingin yang dioperasikan oleh 2 atau 4 silinder hidrolik, Tergantung pada ukuran *cooler*, dan memiliki *independent drive*. *Crossbar* bekerja dengan cara seperti pada gambar 2.3 Semua bar bergerak maju



(Gambar 2.3 (a)) kemudian setiap baris lainnya bergerak mundur (Gambar 2.3 (b)) dan sisanya baris lainnya bergerak mundur (Gambar 2.3 (c)) kemudian berulang secara terus menerus. *Crossbar* ini bekerja pada temperatur 500°C - 600°C.



Gambar 2. 2 Mekanisme *crossbar* (FLSmidth 2016)

2.3. Material *Crossbar* (ASTM A48)

Material *crossbar* yang sesuai standar adalah besi tuang kelabu (*grey cast iron*) yang sesuai dengan ASTM A48. Besi cor kelabu cocok sebagai aplikasi *internal combustion engine cylinder blocks, pump housings, valve bodies, electrical boxes, and decorative castings*. Spesifikasi fasa yang terbentuk pada besi cor kelabu antara lain *pearlite* dan *ferrite*. **Tabel 2.1** menunjukkan komposisi kimia dari ASTM A48 antara lain sebagai berikut :

Tabel 2. 1 Komposisi Kimia pada ASTM A48 (ASTM A48, 1999)



ASTM	Komposisi (wt%)				
	C	Mn	Si	S	P
A48	2,7-4	0.8	1.8-3	0.07	0.2

Sifat mekanik dari ASTM A48 juga bermacam-macam. **Tabel 2.2** menunjukkan macam-macam sifat mekanik pada ASTM A48. Salah satunya adalah nilai kekerasan pada ASTM A48 (ASTM A48, 1999)

Tabel 2. 2 Sifat mekanik pada ASTM A48 (ASTM A48,1999)

Type of Gray Cast Iron	Matrix Microstructure Around Flake Graphite	Brinell Hardness (BHN)
Soft-Annealed	All Ferrite	110-140
Ordinary	Pearlite and Ferrite	140-200
Higher Strength	Fine Pearlite	200-270
Alloyed-Arcicular	Bainite	260-350
Austenitic (Ni-Resist)	Austenite	140-160
Heat Treat Hardened	Martensite	480-550
Hardened and Tempered	Tempered Martensite	250-450
Chilled (White Iron)	Pearlite and Carbides	400-500

2.4. Baja AISI D2

Material ini adalah Baja paduan dengan kandungan karbon tinggi, krom tinggi. **Tabel 2.3** menunjukkan komposisi kimia pada baja AISI D2 antara lain sebagai berikut :

Tabel 2. 3 Komposisi Kimia pada Baja AISI D2 (ASTM A681, 1999)

AISI	Komposisi (wt%)						
	C	Si	Mn	Cr	S	P	Mo
D2	1.4-	0.1-	0.1-	11-	0.03	0.03	0.7-
	1.6	0.6	0.6	13	Max	Max	1.2



Meskipun sebagian besar aplikasi dari alat baja D2 melibatkan kerja dingin, juga banyak digunakan untuk kerja di temperature tinggi juga. Aplikasi yang umum termasuk *blanking dies, slitting cutters, shear blades, forming dies, knurls, gages (plug and thread), punches, trimming dies, etc.* (Arain 1999)

Sifat mekanik dari AISI D2 juga bermacam-macam, salah satunya adalah kekerasan. **Tabel 2.4** menunjukkan macam-macam nilai kekerasan pada AISI D2. (ASTM A681, 1999)

Tabel 2. 4 Hardness Baja AISI D2 (ASTM A681, 1999)

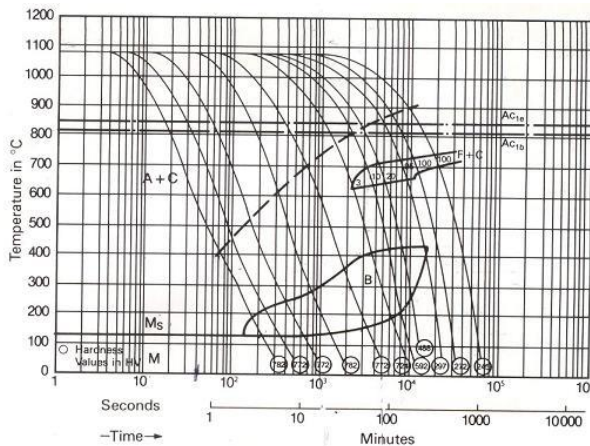
Type	Annealed BHN	Cold Drawn BHN
D2	255	269

Perlakuan panas dapat dilakukan pada baja AISI D2. Pada **Tabel 2.5** dijelaskan tentang macam-macam perlakuan panas yang dapat dilakukan.

Tabel 2. 5 Perlakuan panas pada baja AISI D2 (ASTM A681, 1999)

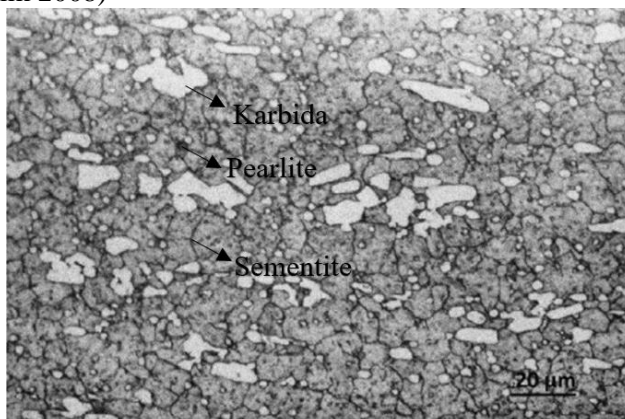
Type	Preheat Temperature °C	Austenitizing Temperature °C		Quench Medium	Tempering Temperature
		Salt Bath	Controlled Atmosphere Furnaces		
D2	816	996	1010	Air	204

Diagram transformasi (Diagram CCT) yang digunakan sebagai acuan pada rekayasa proses perlakuan baja AISI D2 seperti pada Gambar 2.4., digunakan untuk mengetahui laju pendinginan yang diperlukan untuk menghasilkan suatu struktur mikro dan sifat mekanik (kekerasan) tertentu.



Gambar 2. 3 Grafik TTT baja AISI D2 (Muslim 2008)

Pada Gambar 2.5 menunjukkan mikrostruktur dari Baja AISI D2 yang terdiri dari sementite, pearlite, dan karbida Cr (Muslim 2008)



Gambar 2. 4 Struktur Mikro Baja AISI D2 (Muslim 2008)

2.5. Diagram Fase Fe-Fe₃C

Dalam besi cair karbon dapat larut, tetapi dalam keadaan padat kelarutan karbon dalam besi akan terbatas. Selain sebagai



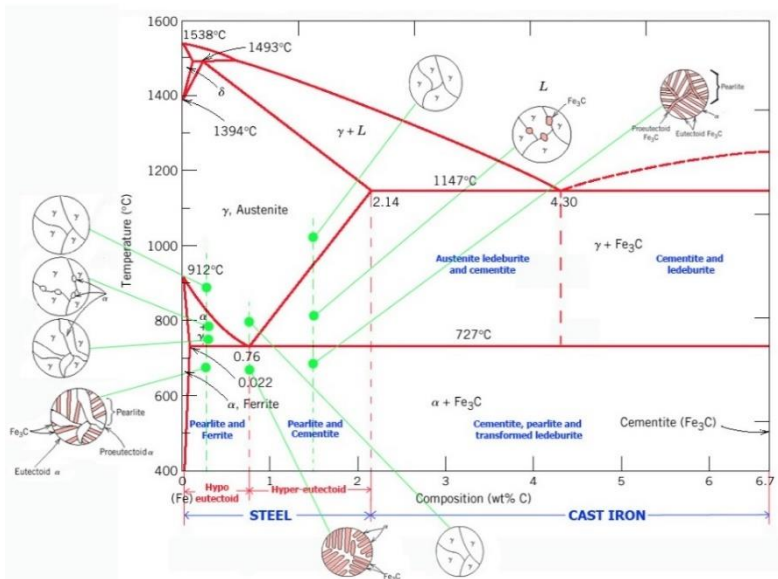
larutan padat, besi dan karbon juga dapat membentuk senyawa *interstisial* (*interstitial compound*), eutektik dan juga eutektoid, atau mungkin juga karbon akan terpisah (sebagai grafit). Karena itu diagram fase besi-karbon ada 2 macam, diagram fase besi – karbida besi dan diagram fase besi – grafit.

Diagram keseimbangan besi – karbon cukup kompleks, tetapi hanya sebagian saja yang penting bagi dunia teknik, yaitu bagian antara besi murni sampai senyawa *interstisialnya*, karbida besi Fe_3C , yang mengandung 6,67 %C. dan diagram fase yang banyak digunakan adalah diagram fase besi – karbida besi, diagram $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$.

Pada keadaan yang betul – betul ekuilibrium karbon akan berupa karbon bebas (grafit), sehingga akan diperoleh diagram kesetimbangan besi - grafit. Perubahan – perubahan dalam keadaan ekuilibrium berlangsung terlalu lama. Seharusnya karbida besi akan terjadi pada temperatur kamar (pada temperatur sekitar 700°C pun perubahan ini akan makan waktu bertahun – tahun). Dalam hal ini karbida besi dikatakan sebagai suatu struktur yang metastabil. Diagram fase besi – karbida dapat dilihat pada Gambar 2.6. (Avner, 1974)

Dari Gambar 2.6. tampak bahwa diagram fase ini memiliki tiga garis mendatar yang menandakan adanya reaksi yang berlangsung secara *isothermal*, yaitu :

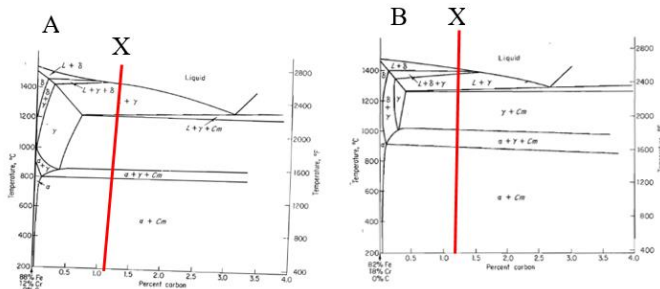
- Pada 1496°C , kadar karbon antara 0.10 – 0.50 %, berlangsung reaksi peritektik. $\text{L} + \delta \rightarrow \gamma$ (daerah ini tidak begitu penting untuk dunia teknik)
- Pada 1130°C , kadar karbon antara 2,0 – 6,67 %, berlangsung reaksi eutektik. $\text{L} \rightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$
- Pada 723°C , kadar karbon antara 0.025 – 6.67 %, berlangsung reaksi eutektoid. $\Gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$



Gambar 2. 5 Diagram fase Fe - Fe₃C (Avner, 1974)

2.6. Diagram Fase Fe – 12% & 18% wt Cr – C

Material *crossbar* yang gagal adalah baja dengan kadar *chromium* yang sangat tinggi yaitu 16.344 % Cr. Baja perkakas yang biasa diproduksi adalah Baja perkakas hipereutektik, pada Gambar 2.7. menunjukkan diagram fasa Fe – Fe₃C yang mengandung unsur Cr sebesar 12% & 18%. Adanya Cr menaikkan temperature krisis dan mempersempit daerah austenite.



Gambar 2. 6 (A) Diagram fase Baja Chrom pada 12% Cr dan (B) Diagram fase Baja Chrom pada 18% Cr (Avner, 1974)

Jika memplotkan material *crossbar* yang standar dengan kadar karbon 1.1742 %C (**Garis X**), maka saat dilakukan pemanasan diatas temperature austenit dan kemudian dilakukan pendinginan secara cepat (*quenching*) dan dilakukan proses *tempering* maka akan diperoleh fasa martensit temper. Mengingat bahwa martensit adalah struktur yang sangat keras dan getas maka baja yang digunakan sebagai *crossbar* adalah yang mengandung sejumlah besar martensit temper yang memiliki sifat mekanik yang tidak sekeras dan segetas fasa martensit. (Avner, 1974)

2.7. Baja Paduan

Baja adalah paduan besi dan karbon yang mungkin mengandung unsur paduan lainnya; ada banyak jenis paduan yang memiliki komposisi dan perlakuan panas yang berbeda. Sifat mekanik sangat dipengaruhi oleh kandungan karbon, yang biasanya kurang dari 1,0 wt%. Pada umumnya baja diklasifikasikan menurut konsentrasi karbon yaitu karbon rendah, menengah, dan tinggi. Selain itu juga dapat dikelompokkan berdasarkan kandungan unsur paduannya. Baja karbon biasa (plain carbon steel) yang hanya berisi konsentrasi karbon dan baja selain itu memiliki sedikit pengotor dan sedikit paduan manganese. Untuk baja paduan, unsur paduan ditambahkan untuk tujuan tertentu dengan konsentrasi tertentu. (Callister, 2007)



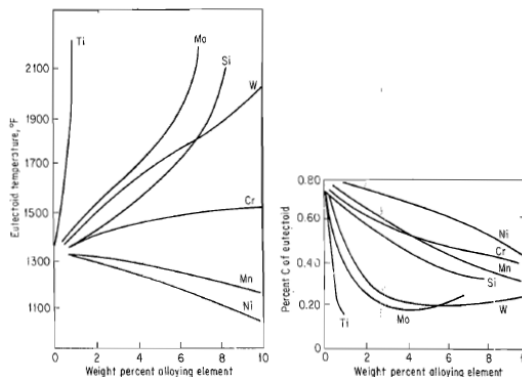
2.7.1. Baja Paduan Tinggi (*High Alloy Steel*)

Baja paduan tinggi merupakan baja paduan yang elemen paduannya lebih dari 10% wt, misalnya unsur Cr, Mn, Ni, S, Si, P dan lain-lain.

Baja paduan tinggi biasanya memiliki sifat tertentu antara lain baja tahan karat (*stainless steel*), baja perkakas (misalnya *High Speed Steel (HSS)*), *heat resisting steel*, dan lain lain. (Amanto, 1999).

2.7.2. Pengaruh terhadap diagram fasa

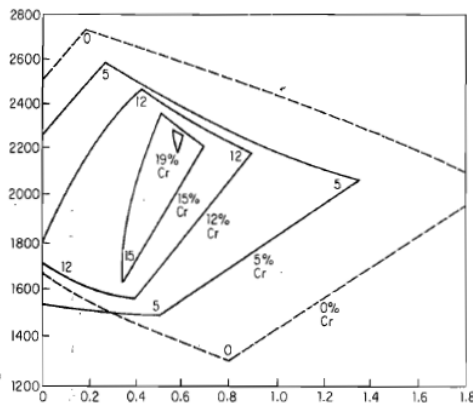
Adanya unsur paduan di dalam baja akan merubah diagram fase baja. Pada umumnya titik eutectoid akan tergeser ke kiri, sehingga kadar karbon di dalam perlit akan kurang dari 0,8%. Unsur paduan yang berfungsi sebagai penstabil austenit, yaitu Ni dan Mn, menurunkan temperatur eutektoid, sedangkan unsur paduan penstabil ferrit, akan menaikkan temperature eutektoid (Gambar 2.8.) Jadi unsur paduan penstabil ferrit akan menggeser titik eutektoid ke kiri atas, sedang penstabil austenite menggeser titik eutektoid ke bawah. (Avner, 1974)



Gambar 2. 7 Pengaruh unsur paduan terhadap temperatur eutectoid (kiri) dan kadar dalam eutectoid (kanan) (Avner, 1974)



Selain itu unsur paduan penstabil ferrit akan memperluas daerah ferrit dan memperkecil daerah austenit, ini digambarkan dengan makin sempitnya daerah austenit dari baja dengan kadar karbon kromium yang makin tinggi seperti pada Gambar 2.9. (Avner, 1974)



Gambar 2. 8 Pengaruh kadar chromium terhadap luasan daerah austenite (Avner, 1974)

2.8. Analisa Kegagalan

Analisa kegagalan dapat diartikan sebagai pemeriksaan/pengujian terhadap komponen-komponen atau struktur yang mengalami kerusakan beserta kondisi yang menyebabkan kegagalan dengan tujuan untuk mengetahui penyebab dari kegagalan tersebut. Jadi tujuan utama dari analisa kegagalan adalah untuk mengetahui mekanisme terjadinya kegagalan serta memberikan solusi-solusi yang dapat dilaksanakan untuk menanggulangi masalah kegagalan tersebut.

Dengan kata lain, analisa kegagalan berujung pada observasi pada komponen-komponen yang rusak. Pengamatan pola patahan yang rusak adalah kunci bagi seluruh proses analisa kegagalan, oleh sebab itu pengamatan secara makrokopis dan mikrokopis harus dilaksanakan secara bertahap. Selain itu pengujian mekanik juga diperlukan karena secara umum kegagalan disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja dari lingkungan kerja komponen.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Menurut sumber-sumber penelitian yang ada di dunia industri (Brooks 2002). Faktor penyebab kegagalan yang sering terjadi di dunia industri dapat dikarenakan :

1. Faktor kesalahan pemilihan material

Hasil penelitian mengenai faktor kegagalan material yang dominan yaitu faktor kesalahan dalam memilih material. Tabel 2.6 dibawah ini menunjukkan statistik tentang permasalahan dalam kasus kegagalan material

Tabel 2. 6 Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin
(Brooks 2002)

Permasalahan	%
Kesalahan pemilihan material	38
Cacat produksi	15
Kesalahan perlakuan panas	15
Kesalahan desain mekanik	11
Kondisi operasi yang berlebihan	8
Kondisi lingkungan yang tidak terkontrol	6
Pemeriksaan yang kurang baik	5
Material yang tidak jelas	2

2. Perawatan komponen yang kurang baik

Proses perawatan komponen mesin yang kurang baik termasuk salah satu penyebab kegagalan yang paling dominan. Tabel 2.7 menunjukan data mengenai kasus kegagalan material yang terjadi.

Tabel 2. 7 Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin (Brooks 2002)

Permasalahan	%
Perawatan yang kurang baik	44
Cacat saat fabrikasi	17
Defisiensi desain	16
Pemakaian yang abnormal	10
Cacat material	7
Penyebab yang tidak jelas	6



3. Kesalahan dalam perancangan komponen

Faktor kesalahan dalam proses perancangan komponen mesin adalah sebagai berikut:

1. Kegagalan ulet akibat pembebanan yang melebihi kekuatan material
2. Kegagalan getas akibat beban kejut
3. Kegagalan pada temperatur tinggi (pemuluran)
4. *Static delayed fracture*
5. Proses perancangan yang terlalu banyak memicu konsentrasi tegangan seperti takikan
6. Analisa tegangan komponen yang kurang detail yang menyebabkan rawan terjadi kegagalan akibat *overload*
7. Kesalahan dalam menentukan material dari komponen mesin sehingga mempengaruhi hitungan yang dilakukan.

4. Kondisi kerja yang ekstrim

Permasalahan yang spesifik dalam kegagalan komponen mesin akibat kondisi kerja yang ekstrim disajikan dalam Tabel 2.8.

Tabel 2. 8 Penyebab kegagalan dalam komponen mesin (Brooks 2002)

Penyebab Kegagalan	%
Korosi	29
Kelelahan (<i>fatigue</i>)	25
Kegagalan getas (<i>brittle fracture</i>)	16
Kelebihan beban	11
Korosi temperature tinggi	7
Korosi retak tegang, korosi lelah, penggetasan hydrogen	6
Pemuluran (<i>creep</i>)	3
Abrasi, Erosi	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



2.9 Prosedur Dalam Analisa Kegagalan

Ketika terjadi sebuah kegagalan atau retak, perlu dilakukan suatu tindakan untuk mencegah terjadinya kegagalan yang sama dengan menginvestigasi dan menganalisa kegagalan komponen yang terjadi. Adapun tindakan yang perlu dilakukan dalam menginvestigasi komponen yaitu (Nishida 1992):

1. Material yang digunakan
 - a. Data produksi : *melting, rolling, forming, casting, heat treatment*, dan proses *machining*
 - b. Analisa kimia : pengujian X-Ray, komposisi kimia
 - c. Sifat mekanik : *tensile, bending, hardness, impact*, dan *fatigue test*.
 - d. Struktur metalurgi : struktur makro dan mikro struktur
 - e. Pengerasan permukaan dan tegangan sisa ; *finishing*
 - f. Patah permukaan
2. Desain tegangan dan kondisi perawatan
 - a. Kekuatan dari luar : golongan, besar, pengulangan.
 - b. Atmospher : udara, air, air laut, dan sebagainya
 - c. Yang lain : kondisi perbaikan
3. Uji percobaan
 - a. Uji laboratorium : perhitungan tegangan (kekuatan material, *finite element method* (FEM), kekuatan lelah, kekerasan patahan.
 - b. Konfirmasi uji lapangan : ukuran tegangan, uji produksi.
4. Hasil uji seluruhnya.

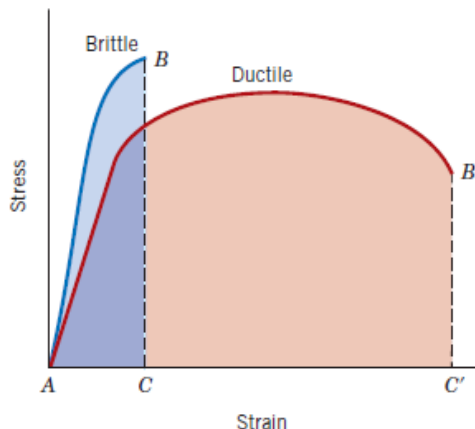
2.10 Patah Getas dan Patah Ulet

Patahan adalah spesimen dari sebuah benda menjadi 2 atau lebih potongan karena terjadinya tegangan statik dan pada temperature yang relatif rendah terhadap titik leleh dari suatu material. Tegangan yang terjadi pada material bisa merupakan tegangan tarik, tegangan kompresi, tegangan geser ataupun torsi. Dalam rekayasa material terdapat dua jenis mode patahan yang mungkin terjadi yaitu patahan ulet dan patah getas. Klasifikasi



jenis patahan ini berdasarkan kemampuan sebuah material dalam menerima deformasi plastis yang dapat menyerap energi yang besar sebelum terjadi patahan. Material yang ulet mempunyai deformasi plastis yang tinggi, pembentukan small cavity diujung retak, serta retak memanjang atau menjalar bertahap. Sedangkan pada material yang getas mempunyai deformasi plastis rendah, tegangan lokal meningkat pada ujung retak sehingga retak menjalar dengan sangat cepat. Pada Gambar 2.10. ditunjukkan diagram tegangan dan regangan dari patahan ulet dan getas.

Patahan ulet dan getas pada suatu material tergantung pada kondisi pembebanan. Pada proses terjadinya patahan melibatkan dua tahap yaitu terbentuknya retak dan perambatan sebagai respon dari tegangan yang dialami oleh material. Modus patahan sangat bergantung pada perambatan retak



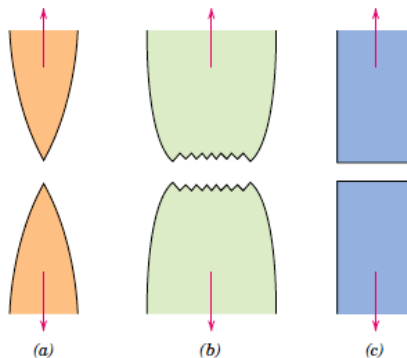
Gambar 2. 9 Skematik ciri patah getas dan patah ulet dari diagram tegangan-regangan(Callister,2007)

2.10.1 Patahan Ulet

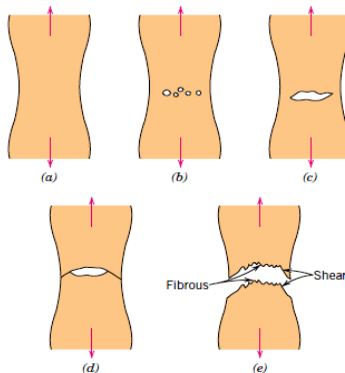
Bentuk patahan ulet memiliki karakteristik yang berbeda jika diamati secara makroskopis. Pada Gambar 2.11. ditunjukkan skematik representative dari dua karakteristik profil patahan secara makro. Konfigurasi yang ditunjukkan oleh Gambar

2.11.(a) ditemukan pada material lunak seperti emas pada temperature ruang dan metal, polimer dan inorganik gelas pada temperature yang relatif tinggi.

Secara umum profil patahan material ulet akibat tegangan tarik ditunjukkan pada Gambar 2.11.(b) dimana patahan didahului oleh adanya necking. Proses patahan ulet dari material terjadi dalam beberapa tahap. Pertama, setelah terjadi pengecilan luasan setempat (*necking*) *cavities* kecil atau *microvoid* terbentuk di dalam struktur material seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.12.



Gambar 2. 10 (a) bentuk patahan ulet, (b) bentuk patahan ulet setelah terjadi necking, (c) bentuk patahan getas tanpa terjadi deformasi plastis (Callister,2007)



Gambar 2. 11 Tahap patahan cup and cone (a) awal necking, (b) terbentuknya cavity kecil, (c) pengumpulan cavity hingga menjadi retakan, (d) perambatan retak, (e) patahan geser dengan sudut 45° terhadap arah tegangan(Callister,2007)

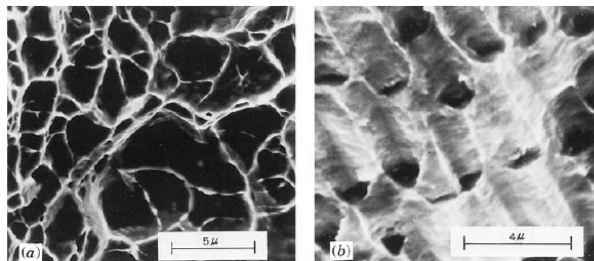
Kemudian dengan bertambahnya deformasi akibat tegangan maka *microvoid* membesar dan berkumpul menjadi satu yang kemudian *coalesce* membentuk retak secara elips yang memiliki panjang tegak lurus dari arah pembebanan. Retak kemudian tumbuh sejajar dengan arah pembebanan, akhirnya patahan terbentuk oleh perambatan retak yang cepat disekitar area *necking* seperti Gambar 2.12. (e) oleh deformasi geser pada sudut disekitar arah tegangan tarik dimana sudut ini merupakan tegangan geser tertinggi. Terkadang sebuah patahan mempunyai karakteristik kontur seperti *cup* dan *cone* karena salah satu permukaan patahan menyerupai *cone*. Spesimen yang mempunyai bentuk patahan seperti ini berbentuk fibrous yang tidak teratur dimana hal ini menandakan deformasi plastis. Lebih jauh lagi untuk mengetahui informasi mengenai penentuan secara pengujian dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Studi mengenai tipe patahan disebut *fractographic*. *Scanning Electron Microscope* (SEM) lebih banyak digunakan dalam mengamati bentuk crack, patahan karena mempunyai resolusi dan kedalaman observasi yang lebih tinggi dari

mikroskopik optik. Gambar 2.13. menunjukkan patah ulet *cup* dan *cone* dan perbedaan patah getas pada *mild steel*



Gambar 2. 12 (a) patah ulet (cup and cone) pada aluminium, dan (b)patah getas pada mild steel (Callister,2007)

Pada skala makro, patah ulet ditunjukkan dengan adanya perubahan ketinggian yang nyata sepanjang penampang potongan melintang dari benda, biasa dikenal dengan istilah *shear lips*. Kemudian pada skala mikro, patah ulet ditandai dengan adanya profil *dimple* pada permukaan patahnya yang disebabkan oleh penjarangan retakan mikro (*microvoids coalescence*) pada gambar 2.14.



Gambar 2. 13 (a) SEM yang menunjukkan spherical dimple karakteristik, patahan hasil beban tarik uniaxial, 3300 \times , dan (b) SEM yang menunjukkan spherical dimple karakteristik hasil beban geser, 5000 \times (Callister,2007)

2.11. Mekanisme Pembentukan Patah Lelah

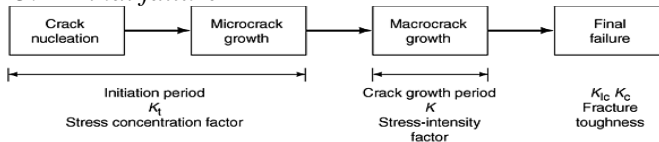
Kelelahan mengakibatkan terjadinya patah lelah. Patah lelah terjadi melalui tiga tahap yaitu tahap retak awal (*crack initiation*), tahap penjarangan retak (*crack propagation*), dan tahap patah statis. Dan setelah retak lelah merambat cukup jauh, maka



beban yang bekerja hanya akan didukung oleh penampang tersisa yang belum retak dan akhirnya komponen akan patah (tahap *final failure*).

Menurut Schijve, terdapat 5 fase yang selama proses *fatigue*, yaitu : (ASM Handbook Committee Volume 19, 2002):

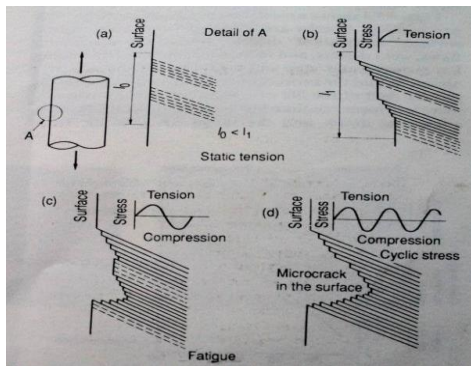
1. *Cyclic slip*
2. *Crack nucleation*
3. *Growth of microcrack*
4. *Growth of macrocrack*
5. *Final failure*



Gambar 2. 14 Mekanisme patah lelah dan faktornya (ASM Handbook Vol.19 Fatigue and Fracture,2002)

2.11.1 Tahap Retak Awal (*Crack Initiation*)

Awal retak biasanya dimulai dari permukaan. Hal ini terjadi karena permukaan menerima beban terbesar dan paling memungkinkan terjadinya konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh adanya perubahan dimensi pada permukaan atau proses pengerjaan tertentu pada material. Adanya cacat dalam menyebabkan juga konsentrasi tegangan. Fenomena awal retak secara sederhana diberikan oleh Wood. Beberapa model diberikan dalam menjelaskan *fatigue crack* pada gambar 2.16.



Gambar 2. 15 Model Wood untuk pengintian retak (Nishida, Shin-ichi,1992)

Pada beban tarik pertama, slip terjadi dengan membentuk permukaan bertingkat yang membentuk sudut 45° dengan sumbu tegangan. Hal ini akibat tegangan geser maksimal yang terjadi pada sudut tersebut. Pembebanan selanjutnya menyebabkan slip pada arah yang berlawanan. Slip ini terjadi pada bidang yang berdekatan dengan yang pertama. Dan selanjutnya merupakan proses pengulangan dalam pembebanan siklus yang sama. Tahap retak awal ini meliputi fase *cyclic slip*, fase pembentukan inti retak (*crack nucleation*) dan pertumbuhan retak mikro (*growth of microcrack*).

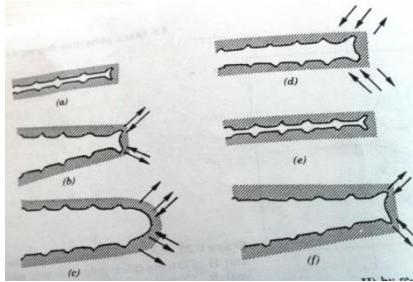
2.11.2 Tahap Perambatan Retak (*Crack Propagation*)

Perambatan retak pada suatu komponen terjadi jika tegangan maksimum pada ujung retakan berada di atas kekuatan material. Hal ini mengakibatkan peningkatan konsentrasi tegangan pada ujung retak. Awal retakan mula-mula menjalar pada bidang slip di dalam beberapa butir dengan kecepatan yang sangat lambat. Pengamatan secara makro tidak menampakkan perambatan ini. Peristiwa ini disebut perambatan retak tahap I.

Selanjutnya pertumbuhan retak pada tahap II ditandai dengan adanya striasi. Pada tahap ini pertumbuhan retak tegak lurus dengan tegangan tarik maksimum. Retakan mulai kelihatan



dengan mata telanjang, oleh karena itu disebut dengan retak makro. Pengamatan retak pada penelitian biasanya difokuskan pada tahap ini. Adapun model mekanisme crack secara plastis terdapat pada Gambar 2.17 dibawah ini.



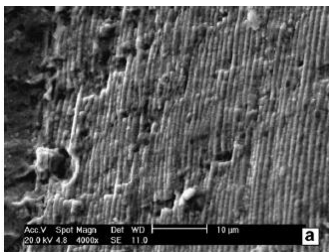
Gambar 2. 16 Mekanisme penumpulan ujung retakan secara plastis (a) beban nol (b) beban tarik kecil (c) beban tarik maksimum (d) beban-tekan kecil (e) beban tekan maksimum (f) beban tarik kecil (Callister,2007)

2.12. Karakteristik Patahan

Klasifikasi dasar dari proses patah bila ditinjau dari modus dan penyebabnya adalah patah ulet, patah getas, patah lelah (*fatigue*), dan patah merangkak (*creep/monotonic*). Masing-masing dari jenis patahan diatas memiliki karakteristik tersendiri. Berikut adalah karakteristik dasar untuk membedakan jenis patah lelah dengan patah merangkak, jenis patah getas dengan patah ulet pada skala makro, dan jenis patah getas dengan patah ulet pada skala mikro (*ASM Handbook Committee Volume 12, 2002*):

❖ Perbedaan karakteristik antara patah lelah dengan patah merangkak

Beachmarks dan striasi mengindikasikan patah lelah, sedangkan pada patah merangkak parameter tersebut tidak terlihat. Pertanda kehadiran beach marks bisa diketahui melalui pengamatan makro menggunakan *stereomicroscope*, dan striasi hanya bisa diamati pada saat dilaksanakan *SEMfractography* (Gambar 2.18). Profil *beachmarks* dan striasi ini merupakan hasil dari fluktuasi beban yang diberikan pada benda.



Gambar 2. 17 Foto SEM yang menunjukkan Beachmarks dan striasi secara mikro (Poursaedi, 2005)

- ❖ Perbedaan karakteristik antara patah getas dengan patah ulet pada skala makro

Pada skala makro, patah ulet ditunjukkan dengan adanya perubahan ketinggian yang nyata sepanjang penampang potongan melintang dari benda, biasa dikenal dengan istilah *shear lips*. Kemudian pola patah getas ditunjukkan dengan permukaan patahan yang datar dan tegak lurus terhadap arah beban, serta tanpa adanya petunjuk bahwa telah terjadi deformasi plastis sebelum benda mengalami patah. Selain kedua karakteristik diatas, terdapat pola patahan gabungan (*mix-mode appearance*) baik patah getas yang bertransformasi jadi ulet ataupun patah ulet yang bertransformasi menjadi getas. Kebanyakan kasus yang terjadi adalah patah getas bertransformasi menjadi patah ulet. Contoh ciri patah ulet ditunjukkan pada Gambar 2.19.

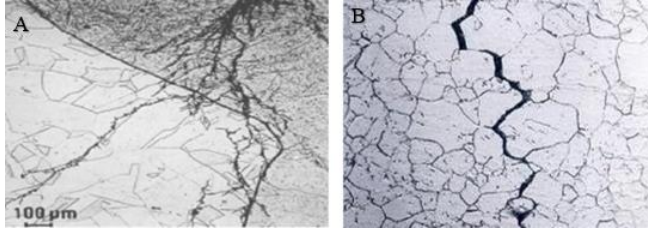
- ❖ Perbedaan karakteristik antara patah getas dengan patah ulet pada skala mikro

Pada skala mikro, patah ulet ditandai dengan adanya profil *dimple* pada permukaan patahnya yang disebabkan oleh penjarangan retakan mikro (*micro voids coalescence*). Sedangkan patah getas ditandai dengan salah satu dari fenomena berikut:

- a. Patahan melintasi butiran atau patah transgranular, dikenal dengan nama *cleavage*, ditunjukkan pada Gambar 2.19 (a)



- b. Patahan melewati batas butir atau patah intergranular, dikenal dengan nama *intergranular embrittlement*, ditunjukkan pada Gambar 2.19 (b)



Gambar 2. 18 Retakan dengan pola rambatan (a)Transgranular
(b) Intergranular (Colangelo, 1989)

2.13. *Heat Treatment*

Perlakuan panas adalah kombinasi operasi pemanasan dan pendinginan terhadap logam atau paduan dalam keadaan padat dengan waktu tertentu, dimaksudkan untuk memperoleh sifat tertentu (Rochman Rochiem 2009). Secara umum heat treatment dibagi dalam tiga tahap, yaitu:

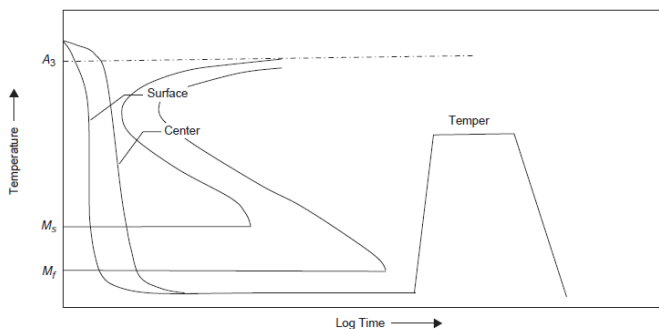
1. Pemanasan sampai suhu tertentu sesuai dengan proses heat treatment dan dengan kecepatan tertentu tergantung dari dimensi dan konduktifitas perpindahan panas benda kerja.
2. Mempertahankan suhu untuk waktu tertentu, sehingga temperaturnya merata pada seluruh bagian benda kerja.
3. Pendinginan dengan media pendingin yang bergantung pada proses heat treatment dan benda kerja. Pada baja karbon rendah dan sedang biasanya digunakan air sebagai media pendingin, karena laju pendinginannya cukup cepat sehingga terbentuk martensit. Sedangkan pada baja karbon tinggi dan baja paduan digunakan minyak sebagai media pendingin dengan laju pendinginan yang lebih lambat. (Rina Dwi Yani 2008)

2.13.1. *Hardening*

Baja dikeraskan dengan austenitisasi, pendinginan cepat (quenching), dan kemudian tempering untuk mencapai kekerasan akhir. Baja memiliki komposisi yang berbeda-beda maka dari itu

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

penting untuk memahami ketebalan maksimum yang dapat dikeraskan pada suatu media pendingin yang spesifik, misalnya air atau minyak, dan memperkirakan variasi kekuatan akhir dan keuletan yang dapat diperoleh pada temperatur tempering yang berbeda-beda. Prosedur untuk quenching dan tempering seperti pada Gambar 2.20. Tempering tidak digunakan untuk mengeraskan baja. Baja dikeraskan dengan austenitisasi dan quenching. Tempering dilakukan untuk mengembalikan keuletan yang hilang saat dikeraskan dan biasanya penghalusan (softening) diperoleh dengan tempering.



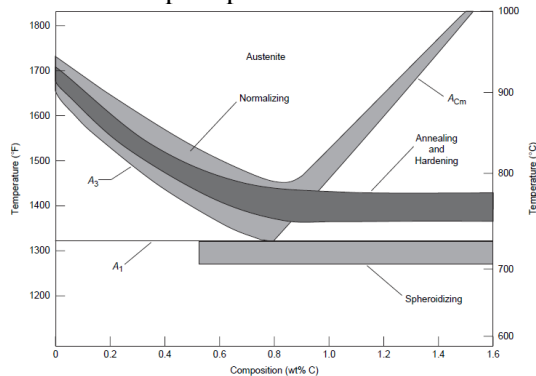
Gambar 2. 19 Perlakuan panas Hardening-tempering pada baja (Campbell 2008)

Kandungan karbon sangat penting terhadap kemampuan suatu baja untuk dikeraskan. Keuletan berkurang dengan meningkatnya kandungan karbon, kandungan karbon pada umumnya dijaga sekitar 0,45% pada baja teknik. Penambahan unsur paduan akan menggeser hidung diagram TTT ke kanan, sehingga mempermudah benda kerja yang tebal untuk dikeraskan. Unsur paduan tidak meningkatkan kekerasan martensit secara signifikan, tetapi hardenability, kedalaman dari permukaan struktur mikro martensit dapat dihasilkan pada baja (Campbell 2008).



2.13.2 Austenitisasi

Pada proses austenitisasi, baja dipanaskan sampai daerah austenit (γ) dan ditahan selama beberapa waktu tertentu untuk melarutkan karbida sampai menjadi larutan padat austenit. Temperatur yang dibutuhkan untuk melakukan austenitisasi pada kadar karbon tertentu seperti pada Gambar 2.21.



Gambar 2. 20 Rentang temperatur austenitisasi pada perlakuan panas (Campbell 2008)

Peningkatan kadar karbon, temperatur berkurang sepanjang garis A_3 sampai mencapai minimum pada A_1 , komposisi eutektoid (0,8%), dan kemudian meningkat sepanjang garis A_{cm} . Tahap pertama pada pembentukan austenit adalah nukleasi dan pertumbuhan austenit dari perlit (ferit+ Fe_3C). Pembentukan austenit yang homogen dapat dipercepat dengan meningkatkan temperatur dan meningkatkan kehalusan partikel karbida mula-mula. Meskipun begitu, temperatur austenitisasi perlu dijaga serendah mungkin untuk mengurangi retak dan distorsi, mengurangi oksidasi dan dekarburisasi, dan mengurangi pertumbuhan butir.

Temperatur yang dibutuhkan untuk mencapai 100% austenit pada baja hipereutektoid cukup tinggi, meskipun begitu austenit untuk pengerasan pada baja dapat diperoleh pada temperatur sekitar 770°C. Karbida yang tidak terlarut dalam



jumlah kecil memiliki pengaruh yang kecil pada sifat mekanik akhir baja (Campbell 2008).

2.13.3 Cooling

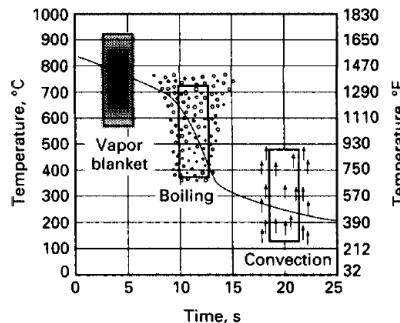
Proses perlakuan panas *hardening* dilakukan dengan memanaskan baja hingga mencapai temperatur austenitisasi, ditahan beberapa waktu tertentu pada temperatur tersebut, lalu didinginkan dengan cepat (*quenching*), sehingga diperoleh martensit. Pada suatu benda kerja yang dikeraskan maka kekerasan yang terjadi akan tergantung pada seberapa banyak martensit yang terbentuk dan kekerasan martensit itu sendiri. Banyaknya martensit yang akan terjadi tergantung pada seberapa banyak austenit yang terjadi pada saat pemanasan dan seberapa cepat pendinginannya sedangkan kekerasan martensit tergantung pada kadar karbon dalam baja yang terlarut dalam austenit.

Pada saat baja didinginkan secara cepat dari temperatur austenitisasi (*quench*), karbon tidak memiliki waktu untuk berdifusi dari struktur mikro austenit ketika struktur ini bertransformasi menjadi BCT (*Body Centered Tetragonal*), struktur ini disebut martensit. Proses *quenching* merupakan proses mendinginkan pada laju pendinginan tertentu untuk membentuk martensit. Distorsi struktur BCT menghasilkan kekuatan dan kekerasan yang tinggi pada baja yang di-*quench*. Beberapa baja di-*quench* dengan air atau oli untuk menghasilkan laju pendinginan yang cukup. Pendinginan dengan air menghasilkan laju pendinginan tercepat juga menghasilkan tegangan sisa yang paling tinggi sehingga dapat menghasilkan distorsi dan retak.

Terdapat tiga tahapan hilangnya panas selama *quenching* pada media liquid, seperti pada Gambar 2.22, yaitu *vapor blanket*, *nucleate boiling*, dan *liquid cooling*. Tahap *vapor blanket* memiliki karakteristik dengan uap air menyelimuti benda kerja. Hal ini terjadi karena suplai panas dari bagian dalam benda kerja yang menuju permukaan melebihi jumlah panas yang dibutuhkan untuk menguapkan *quenchant* dan menghasilkan fasa uap air. Laju pendinginan tertinggi terjadi pada tahap *nucleate boiling*. Selama periode ini uap air terlepas dan laju ekstraksi panas yang



dihasilkan berhubungan dengan pendidihan inti (*nucleate boiling*) dari *quenchant* pada logam. Panas secara cepat dilepas dari permukaan akibat kontak cairan pendingin pada logam dan kemudian menguap. Tahap *liquid cooling* dimulai ketika temperatur permukaan logam berkurang sampai dibawah titik didih cairan *quenching*. Dibawah temperatur ini, pendinginan terjadi dengan mekanisme konduksi dan konveksi pada *quenchant*.



Gambar 2. 21 Tiga tahapan pada quenching (ASM Handbook, Vol 04, Heat Treatment, 1998)

2.13.4 Tempering

Tempering adalah proses pemanasan kembali baja yang telah dikeraskan sampai temperatur dibawah temperatur kritis terendah (A_1), lalu didinginkan pada laju yang diinginkan. Proses ini bertujuan untuk mengembalikan sebagian keuletan/ketangguhan, berakibat turunnya kekerasan, dan melepas tegangan dalam untuk memperoleh keuletan yang lebih baik (Donald S Clark 1962). Struktur martensit dihasilkan dari proses *quenching*, maka dari itu ada tegangan internal besar, diperoleh dari transformasi martensit, sehingga keuletan berkurang. *Tempering* dapat meningkatkan keuletan dan ketangguhan, yang sangat penting untuk meningkatkan penyerapan energi impak dan struktur martensit temper menghasilkan kekuatan dinamik yang baik pada baja (LI Hong-ying 2013)



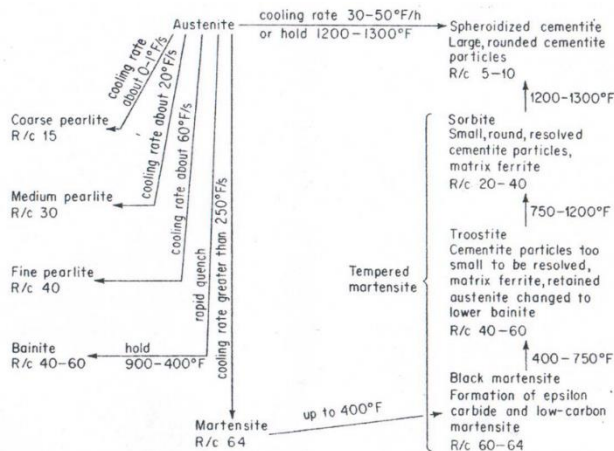
Martensit merupakan suatu struktur yang metastabil, bila dipanaskan kembali secara bertahap karbon yang terperangkap dalam struktur BCT dari martensit tersebut akan keluar menjadi karbida sehingga BCT akan menjadi BCC, ferrit. Proses pemanasan kembali dan pendinginan lambat yang mengikutinya dinamakan *tempering*.

Tempering dilakukan dengan memanaskan suatu baja yang memiliki struktur mikro martenit sampai temperatur dibawah eutektoid dalam waktu tertentu. Pada umumnya *tempering* dilakukan pada temperatur antara 250 dan 650°C, meskipun tegangan internal dapat lepas pada temperatur sekitar 200°C. Perlakuan panas melalui mekanisme difusi, pembentukan martensit temper seperti reaksi dibawah ini,

martensit (BCT, fasa tunggal) \rightarrow martensit temper ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$)

pada reaksi diatas fasa tunggal martensit BCT, yang jenuh dengan karbon, bertransformasi menjadi martensit temper, terdiri dari ferit stabil dan fasa sementit (Callister 2007)

Perubahan struktur yang terjadi setelah proses *tempering* pada pemanasan temperatur tertentu, secara skematik digambarkan pada Gambar 2.23.



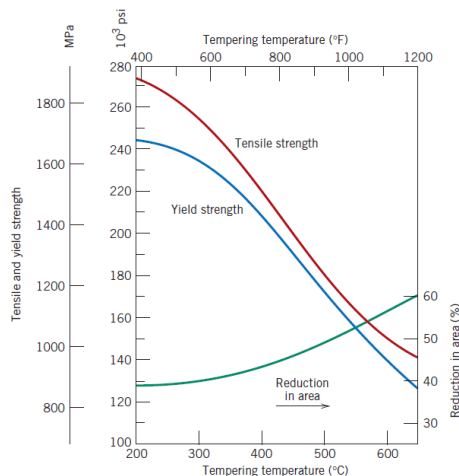
Gambar 2. 22 Skema produk transformasi austenit pada pendinginan dan transformasi martensit pada pemanasan (Tempering) (Avner 1974)

Pada temperatur temper yang masih rendah, di bawah 205°C, karbon yang keluar masih sangat sedikit, karbida yang terjadi, dinamakan karbida epsilon (ϵ carbide), masih sangat kecil, belum tampak di mikroskop (*submicroscopic*), martensit tampak lebih hitam, dinamakan *black martensite*. Pada tahap ini terjadi penurunan tegangan dalam, sedang kekerasan hampir tidak berkurang (masih 60 – 64 HRC), bahkan dapat terjadi sedikit kenaikan (untuk baja dengan kadar karbon tinggi). Pada temperatur temper yang lebih tinggi, 205 – 400 °C, karbida epsilon mulai berubah menjadi sementit, Fe_3C , dan austenit sisa bertransformasi, menjadi bainit atau martensit. Struktur yang terjadi dinamakan *troostite*, terdiri dari partikel sementit yang sangat halus (*submicroscopic*) dengan matriks ferrit dan austenit yang telah bertransformasi. Mulai tampak penurunan kekerasan (40 – 60 HRC) dan kenaikan keuletan yang berarti. Pada temperatur temper yang lebih tinggi lagi, 400 – 650 °C, sementit tumbuh menjadi lebih besar, berbentuk spheroid yang halus dan BCT menjadi BCC sempurna. Struktur ini dikenal dengan nama

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



sorbite, terdiri dari spheroid sementit yang sangat halus yang tersebar dalam matriks ferrit, kekerasan lebih rendah (20 – 40 HRC) dan keuletan/ketangguhan makin tinggi. Bila pemanasan diteruskan lebih tinggi lagi spheroid sementit tumbuh lebih besar dengan matriks ferrit. Struktur ini sama dengan yang diperoleh dengan proses spheroidisasi, kekerasannya rendah (5 – 10 HRC) dan keuletan/ketangguhannya tinggi. Sebenarnya perubahan struktur selama penemperan sangat gradual, sehingga tidak jelas perbedaan struktur yang satu dengan yang berikutnya. Karenanya ada yang menamakan semua produk dekomposisi martensit ini sebagai *martensit temper*. Karbon yang keluar dari struktur martensit maka tegangan didalam BCT akan berkurang sehingga kekerasan/kekuatannya juga berkurang selain itu keuletan/ketangguhan semakin meningkat. Secara umum dapat dikatakan bahwa bila temperatur penemperan makin tinggi maka kekerasannya akan makin rendah (Avner 1974). Pengaruh temperatur penemperan terhadap sifat mekanik seperti pada gambar 2.24



Gambar 2. 23 Hubungan temperatur tempering pada kekuatan luluh dan tarik dan keuletan (%RA) (pada temperatur kamar) untuk paduan baja 4340 oil quench (Callister 2007)



Pada proses temper, kekerasan setelah temper tidak hanya tergantung pada temperatur temper tetapi juga pada waktu tahan pada temperatur tersebut. Hubungan antara temperatur dan waktu tahan dinyatakan sebagai *Hollomon-Jaffe parameter* (HJP). Parameter ini pada umumnya digunakan pada analisa parameter *tempering* martensit dan analisis evolusi sifat mekanik selama *tempering*. Persamaan *Hollomon-Jaffe* seperti persamaan (1) dibawah ini.

$$HJP = T(\log(t) + C) \quad (1)$$

Dimana T adalah temperatur *tempering* dalam Kelvin, t adalah waktu dalam jam, dan C adalah konstanta material, pada baja C bernilai 20. (Avner 1974).

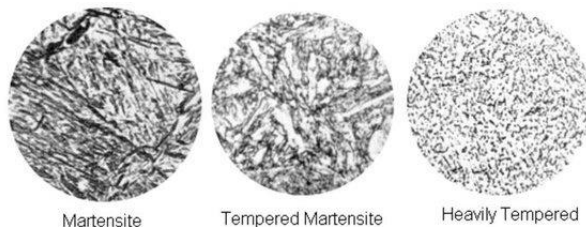
Dalam suatu kondisi tertentu, dapat terjadi suatu anomali pada sifat mekanik baja yang diberi perlakuan *tempering*. *Tempering* pada baja yang sudah dikeraskan pada temperatur rendah tidak akan mengubah nilai kekerasannya akan tetapi dapat menghasilkan kekuatan luluh (*yield strength*) yang diinginkan. *Tempering* pada baja paduan yang memiliki unsur pembentuk karbida seperti molybdenum, kromium, vanadium dan tungsten pada temperatur tertentu dapat menghasilkan *secondari hardening* atau meningkatnya kekerasan dari baja akibat terbentuknya karbida. (ASM, 2002)

2.13.5 *Tempering* pada Martensite

Martensit adalah keras sehingga tidak bisa dipakai sebagian besar aplikasi. Disamping itu tegangan internal karena proses quenching juga memberikan efek perlemahan. Ketangguhan dan keuletan martensit bisa ditingkatkan dan tegangan internal bisa dibuang dengan cara perlakuan panas yang disebut tempering.

Tempering dilakukan dengan memanaskan baja martensit sampai temperatur dibawah eutectoid pada periode waktu tertentu. Biasanya tempering dilakukan pada temperatur antara 250-650 °C. Tegangan internal akan hilang pada temperatur $\pm 200^{\circ}\text{C}$.

Foto struktur mikro tempered martensite sama dengan spheroidit hanya partikel sementit lebih banyak dan lebih kecil. Tempered martensit mempunyai sifat sekeras dan sekuat matensit namun ketangguhan dan keuletan lebih baik. Perbedaan Martensite, Tempered Martensite dan Heavily Tempered Gambar 2.25 (Mizhar 2011)



Gambar 2. 24 Perbedaan struktur mikro dari martensite, tempered martensite, dan heavily tempered (Mizhar 2011)

2.14. Pengujian Kekerasan

Pada umumnya, kekerasan menyatakan ketahanan terhadap deformasi dan merupakan ukuran ketahanan logam terhadap deformasi plastik atau deformasi permanen (Dieter 1987) Hal ini sering diartikan sebagai ukuran kemudahan dan kuantitas khusus yang menunjukkan nilai kekerasan material.

Pada pengujian kekerasan terdapat tiga jenis ukuran kekerasan, hal ini tergantung pada cara melakukan pengujian, yaitu:

1. Kekerasan goresan (*scratch hardness*),
2. Kekerasan lekukan (*indentation hardness*),
3. Kekerasan pantulan (*rebound*)

Pengujian yang sering dilakukan pada logam adalah pengujian kekerasan indentasi. Pada model ini kekerasan suatu material diukur terhadap tahanan plastis dari permukaan suatu material komponen konstruksi mesin dengan spesimen standart terhadap *indentor*. Terdapat berbagai macam uji kekerasan



indentasi, antara lain: uji kekerasan *Brinell*, *Vickers*, *Rockwell*, dan *Knoop*.

Kekerasan dari besi cor umumnya cukup tinggi, sehingga untuk mendapatkan hasil yang maksimum, maka metode pengujian kekerasan yang cocok adalah dengan menggunakan *Brinell Hardness Testing*. (Murtiono 2012)

2.14.1. Uji Kekerasan Brinell

Uji Brinell dilakukan dengan penekanan sebuah bola baja yang terbuat dari baja chrom yang telah dikeraskan dengan diameter tertentu, oleh gaya tekan secara statis kedalam permukaan logam yang diuji harus rata dan bersih. Setelah gaya tekan diiadakan dan bola baja dikeluarkan dari bekas lekukan, maka diameter paling atas dari lekukan tadi diukur secara teliti untuk kemudian dipakai untuk penentuan kekerasan logam yang diuji dengan menggunakan rumus:

$$\text{BHN} = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Dimana :

P = Beban yang diberikan (KP atau Kgf).

D = Diameter indenter yang digunakan.

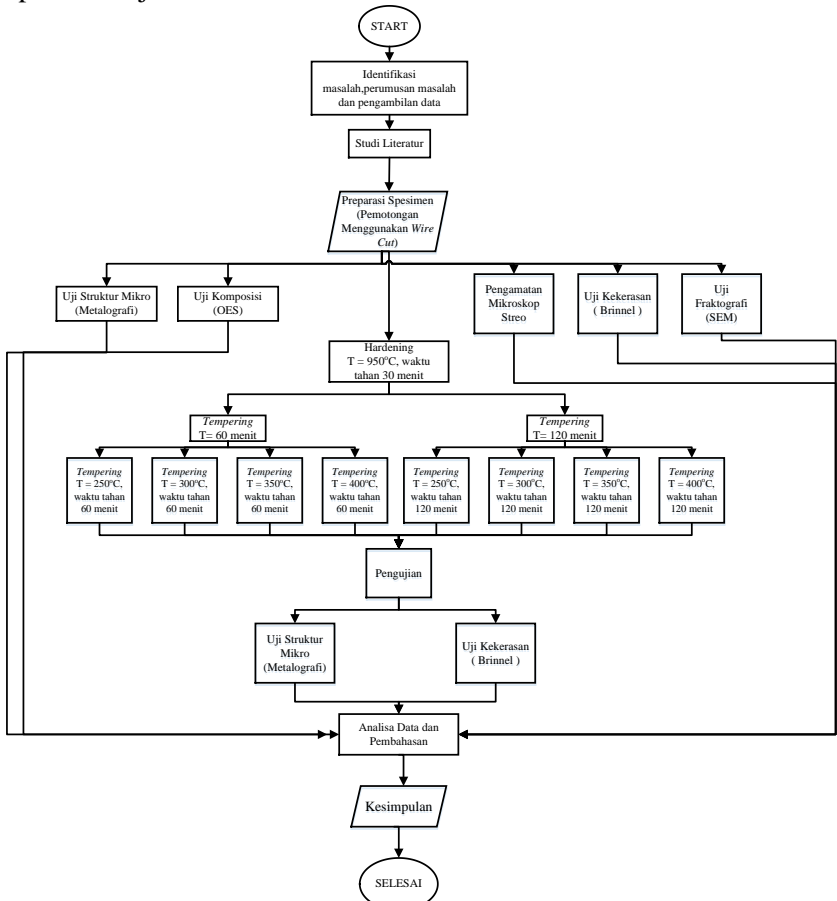
d = Diameter bekas lekukan



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan beberapa pengujian seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.1 dibawah ini



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian



3.2 Metode Penelitian

Metode Penelitian yang digunakan dalam penelitian kali ini antara lain studi lapangan, pengujian dan studi literature. Adapun hal-hal yang mencakup penelitian antara lain:

1. Studi lapangan

Metode ini mengacu pada pencarian informasi tentang komponen yang akan diteliti beserta informasi tentang kegagalan yang terjadi pada komponennya dengan cara terjun langsung ke lapangan yaitu PT. Semen Indonesia, dan berdiskusi dengan dosen mata kuliah, dosen pembimbing, dan pihak PT. Semen Indonesia yang ahli dibidangnya.

2. Studi Literatur

Metode studi literatur mengacu pada buku-buku, jurnal-jurnal penelitian, dan situs industri yang mempelajari tentang permasalahan analisa kegagalan pada *cross bar*.

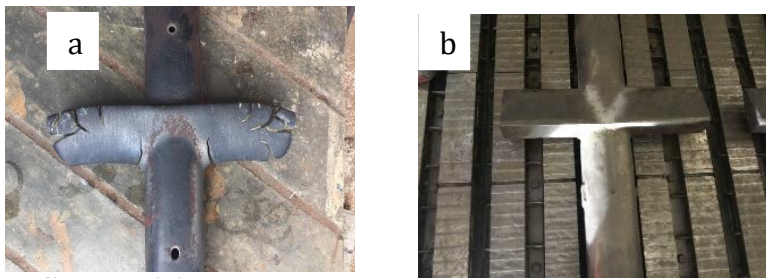
3. Pengujian

Metode ini dilakukan dengan pengujian langsung sesuai dengan prosedur dan metode yang ada. Adapun pengujian yang diperlukan dalam eksperimen ini yaitu : pengamatan bentuk *crack* dengan mikroskop optik dan SEM, pengamatan mikro dengan SEM, uji komposisi dengan menggunakan spektrometer dan uji kekerasan untuk mengetahui nilai kekerasan pada material *cross bar*.

3.3 Material yang digunakan

1. Material

Pada tanggal 21 Juli 2016 ditemukan *cross bar* pada *clinker cooler* Pabrik Tuban 3 mengalami *crack* yang diperlihatkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 a.) Komponen *cross bar* yang *crack*. b.) Bagian *cross bar* yang masih terpasang.

Tabel 3.1 Komposisi Kimia *Crossbar*

Unsur	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al
%	1.174	2.485	0.931	0.065	0.023	0.566	3.594	16.344	0.334	0.106

3.4 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Mesin Wire Cut
Digunakan untuk memotong spesimen.



Gambar 3.3 Mesin Wire Cut

2. Mesin OES (*Optical Emission Spectroscopy*)
Digunakan untuk mengetahui komposisi material uji



Gambar 3.4 Mesin OES

3. Hardness Test
Digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan dari material uji.



Gambar 3.5 Universal Hardness Tester

4. Larutan Etsa Nital dan
Digunakan untuk preparasi pengujian metalografi.
74a: Nital terdiri dari 1-5 mL HNO_3 + 100 mL ethanol (95%) atau methanol (95%)
78: 10 gram potassium metabisulfite + 100 mL aquades
5. Mikroskop Optik
Digunakan untuk mendapatkan informasi struktur mikro/fasa yang terdapat pada material uji.



Gambar 3.6 Olympus Optical Microscope

6. Mesin SEM –EDX

Digunakan untuk mendapatkan informasi kegagalan secara topografi permukaan.



Gambar 3.7 Mesin SEM – EDX

3.5 Tahapan Penelitian

3.5.1 Review Dokumen Perusahaan

Review dokumen perusahaan dilakukan untuk mendapatkan data data perusahaan yang berkaitan dengan *Crossbar* sebagai pendukung hasil penelitian, berikut data yang harus diambil, yaitu:

1. Desain *Crossbar*
2. Data operasi
3. Spesifikasi material
4. *Maintenance record*



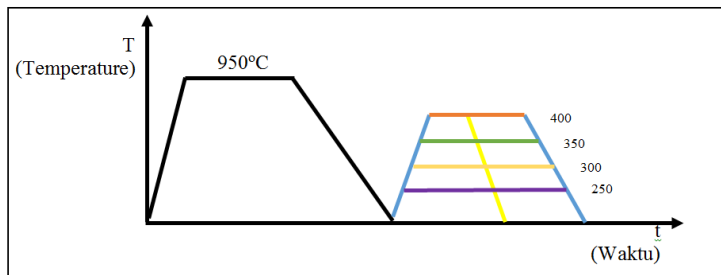
3.5.2 Preparasi Spesimen

Tahap Persiapan ini diperlukan sebelum melakukan pengujian untuk menentukan penyebab kegagalan/keausan *Crossbar* pada PT Semen Indonesia. Persiapan ini berupa proses *cutting* dan *sectioning*.

Proses pemotongan dilakukan pada bagian ujung *Crossbar* yang terindikasi adanya beban siklik dan bagian yang jauh dari aus. Spesimen yang terindikasi adanya beban siklik serta bagian yang jauh dari aus akan diuji sebagai perbandingan antara material yang baru dengan material yang sudah aus/ gagal.

3.5.3 Proses Perlakuan Panas

Proses perlakuan panas yang dilakukan adalah proses *hardening* dengan temperatur 1010°C dan waktu tahan 30 menit. Setelah melakukan proses *hardening*, spesimen akan diberi perlakuan *tempering* dengan dua variabel waktu tahan yang berbeda yaitu 60 dan 120 menit. Masing – masing variabel waktu tahan yang berbeda akan di *tempering* dengan empat variabel temperatur yang berbeda yaitu 250°C, 300°C, 350°C, 400°C.



Gambar 3.8 Siklus termal perlakuan panas pada penelitian

3.5.4 Uji Komposisi

Pengujian komposisi kimia adalah untuk mengetahui komposisi kimia yang terdapat pada komponen yang mengalami kegagalan. Pada identifikasi komposisi kimia menggunakan alat *Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)* di Laboratorium Balai

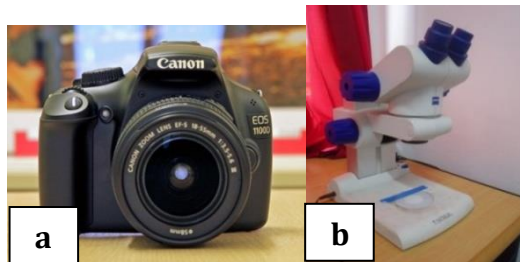
Riset Standarisasi Surabaya (Baristan) untuk mengetahui komposisi yang ada pada *Crossbar*.

3.5.5 Pengamatan Makroskopik

Pengamatan makro dilakukan untuk mengetahui bentuk, tampilan dan lokasi komponen yang mengalami kegagalan secara makro. Pengamatan makro dilakukan menggunakan kamera dan digital dan mikroskop stereo.

Adapun perlakuan terhadap sampel material adalah dengan melakukan pengambilan fotografi dengan kamera digital untuk mendapatkan informasi bentuk dari kegagalan secara makro.

Pengamatan melalui *stereomicroscope* terhadap sampel material dengan beberapa kali perbesaran untuk mendapatkan profil makronya



Gambar 3.9 (a) Kamera merk Nikon tipe SLR.
(b) Stereomicroscope

3.5.6 Pengamatan Mikroskopik

Pada pengamatan Mikroskopik dilakukan dengan menggunakan alat, yaitu :

Scanning Elektron Mikroskop (SEM)

SEM (*Scanning Electron Microscope*) adalah sebuah mikroskop elektron yang didesain untuk menganalisa permukaan dari objek solid secara langsung.

Langkah-langkah yang dilakukan dalam *fractography* menggunakan SEM adalah sebagai berikut :



1. Spesimen yang telah dipotong dibersihkan dengan hati-hati menggunakan *blower* untuk menghilangkan debu dan pengotor ringan lainnya.
2. Spesimen diletakkan diatas holder yang sebelumnya telah dilekatkan dengan *carbon tape*. *Carbon tape* berfungsi untuk melekatkan *holder* dengan sampel
3. Spesimen yang telah berisi *holder* dimasukkan kedalam mesin SEM pada gambar 3.5 dan siap dilakukan proses pengamatan. Pada layar komputer akan tampak permukaan spesimen dengan berbagai perbesaran yang bisa diatur sesuai keinginan.



Gambar 3.10 : Mesin SEM –EDAX FEI type Inspect S-50

3.5.7 Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada sampel material. Pengujian ini dilakukan dengan metode Brinell



dimana dalam pengujiannya memakai indenter bola baja, pembebanan sebesar 187.5 kgf dan waktu indentasi selama 15 detik. Pengujian ini menggunakan *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A* di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, ITS.



Gambar 3. 11 *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A*

Sebelumnya, sampel yang digunakan harus memiliki permukaan yang rata untuk menghindari cacat indentasi.



3.6 Rancangan Penelitian

Tabel 3.2 Rancangan penelitian

Material	Temperatur	Waktu Tahan	Uji Komposisi (OES)	Uji Metalografi	Uji Kekerasan	Pengujian SEM
H	-	-	√	√	√	√
HT250t60	250	60	-	√	√	√
HT300t60	300	60	-	√	√	√
HT350t60	350	60	-	√	√	√
HT400t60	400	60	-	√	√	√
HT250t120	250	120	-	√	√	√
HT300t120	300	120	-	√	√	√
HT350t120	350	120	-	√	√	√
HT400t120	400	120	-	√	√	√



BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data Kegagalan pada Material *Crossbar*

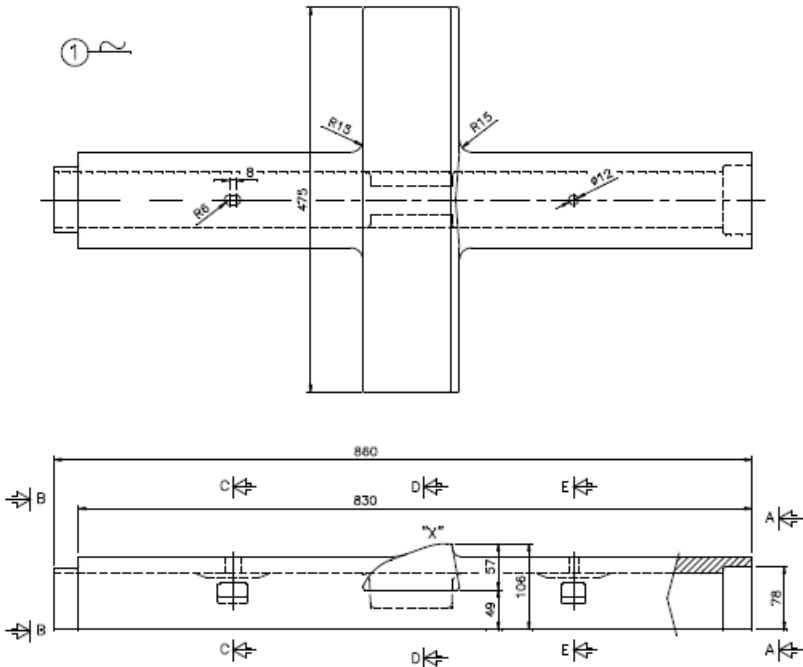
4.1.1 *Record Crossbar KJ210 di Clinker Cooler*

Pada bulan Juli 2016 PT. Semen Indonesia sedang melaksanakan maintenance rutin yang berlangsung selama 2 minggu. Kemudian di *Clinker Cooler* Tuban 3 ditemukan beberapa retakan dari *crossbar* yang merupakan komponen *clinker cooler*. Rancangan umur operasi kerja dari *crossbar* adalah 2 tahun. Akan tetapi, hal ini tidak sesuai dengan kondisi aktual dimana ditemukan retak pada *crossbar* saat *overhaul* setelah 8 bulan *crossbar* tersebut digunakan. *Crossbar* ini menggunakan material *High Carbon High Chrome Tool Steel*.

Berikut ini data-data dari *crossbar* mencakup spesifikasi *crossbar* pada *clinker cooler*.

Tabel 4.1 Data Operasi *crossbar* di *clinker cooler* Tuban 3 PT.
Semen Indonesia

Produksi <i>clinker</i>	354 ton/jam
Temperatur <i>crossbar</i>	500°C – 600°C
Kecepatan Linear	1,45 km/jam
<i>Lifetime</i>	24 Bulan



Gambar 4.1 Desain *crossbar* di PT. Semen Indonesia

4.1.2 Uji Komposisi Unsur

Pengujian komposisi unsur dari spesimen *crossbar* dilakukan dengan menggunakan OES (Optical Emission Spectroscopy). Tabel 4.2 menunjukkan hasil pengujian OES yang dibandingkan dengan komposisi material standar *crossbar*.

Berdasarkan standar yang ada, komponen *crossbar clinker cooler* biasanya menggunakan material besi tuang kelabu (*gray cast iron*) sesuai dengan standar ASTM A48.

Tabel 4.2 menunjukkan komposisi kimia pada sampel uji dan material standar *crossbar*. Berdasarkan hasil pengujian komposisi diatas, komposisi material *crossbar* tidak sesuai dengan standar material *crossbar* yaitu besi tuang kelabu. Tidak adanya *mill certificate* yang menunjukkan kebenaran dari material yang



digunakan, sehingga sulit untuk menentukan perbandingan standar komposisi materialnya.

Komposisi standar untuk *crossbar* yang seharusnya dimana kadar karbonnya lebih dari 2% yang menandakan bahwa material tersebut besi cor. Oleh karena itu komposisi material *crossbar* yang ada di PT. Semen Indonesia ini tidak memenuhi standar dan mengalami *crack* karena kekerasan baja paduan lebih rendah di bandingkan dengan besi cor. (ASTM A48, 1999)

Tabel 4.2 Perbandingan hasil uji komposisi unsur dari spesimen *crossbar* dengan komposisi unsur ASTM A48

Unsur	C	Si	Mn	Ni	S	P	Mo	Cr	Fe
Material	1.2	2.5	0.9	3.6	0.02	0.06	0,33	16	Balance
Uji									
Material	2.7	1.8	0.8	-	0.07	0.2	-	-	Balance
Standar	- 4	- 3							

4.1.3 Pengamatan Makroskopik

Pengamatan secara makroskopik bertujuan untuk melihat kegagalan yang terjadi pada *crossbar*. Kegagalan yang terjadi pada *crossbar* berupa *crack* yang terdapat di beberapa tempat. Gambar 4.2 menunjukkan letak dari kegagalan yang terjadi pada *crossbar*.

Pada gambar 4.2, Bagian yang dilingkari merupakan bagian yang mengalami *crack*. *Crack* pada daerah ini cukup berbahaya dikarenakan letak *crack* pada bagian yang memiliki tegangan paling besar.

Bagian yang mengalami retak dipotong dan dianalisis permukaannya. Setelah diamati dengan menggunakan kamera DSLR, didapatkan bahwa mekanisme retak tersebut dapat dibagi menjadi 3 bagian. Dapat dilihat pada gambar 4.3 mekanisme retakan diawali pada daerah X atau dapat disebut retak awal (*initial crack*), lalu merambat ke daerah Y atau dapat disebut daerah penjaralan retak awal \ (*early propagation*) dan penjaralan berakhir pada daerah Z atau dapat disebut *end propagation*.



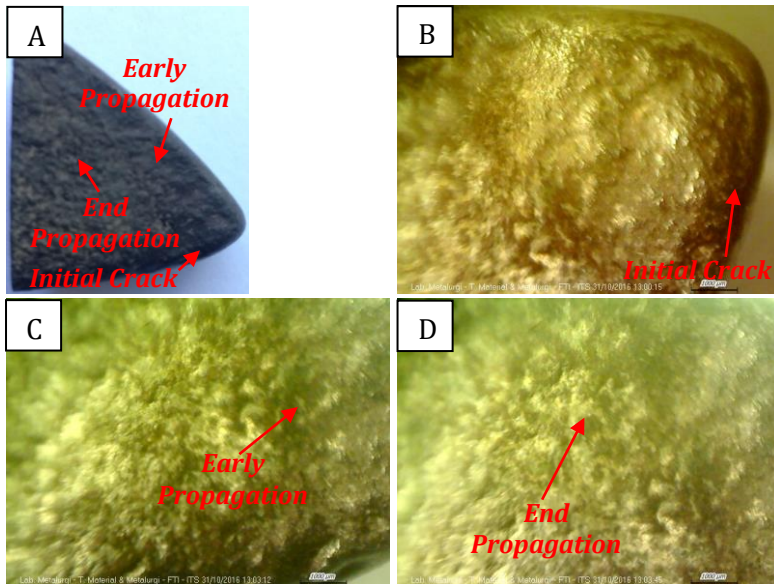
Gambar 4. 1 Crossbar yang mengalami kegagalan (a) Tampak atas (b) Tampak samping



Gambar 4. 2 Pengamatan makro komponen crossbar gagal (crack)

4.1.4 Hasil *Streomicroscope* Pada *Crossbar* yang Gagal

Untuk mengamati kegagalan berupa retak yang terjadi pada *crossbar* dilakukan pengamatan dengan kamera DSLR dengan perbesaran 8 kali. Pengamatan dilakukan untuk mencari bagian – bagian retak, yaitu *initial crack*, *early propogation* dan *end propagation*.



Gambar 4. 3 Observasi visual bagian yang mengalami *crack*
(a) potongan spesimen yang mengalami *crack* (b) *initial crack*
(c) *early propagation* (d) *end propagation*

Gambar 4.4 (a) merupakan hasil foto permukaan dari *crossbar* yang mengalami *crack* difoto menggunakan bantuan Kamera DSLR, dari gambar 4.4 (a) terlihat bahwa terdapat 3 bagian yaitu *initial crack*, *early propagation*, dan *end propagation*. Gambar 4.4. (b) merupakan hasil gambar menggunakan *stereomicroscope* dengan perbesaran 10 kali, dari gambar 4.4. (b) menunjukkan adanya awal retak (*crack initiation*)



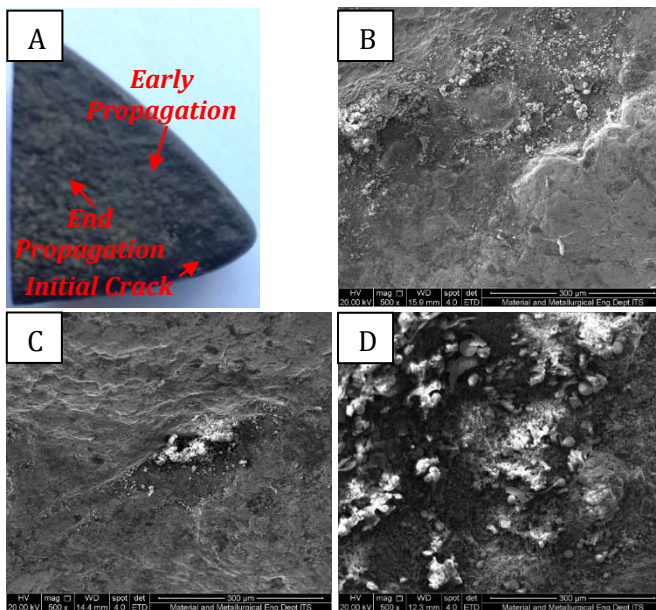
ditunjukkan tanda panah yang kemudian arah retakaannya menjalar ke samping kanan atas kemudian menjalar ke kiri. Terlihat pada gambar 4.4. (b) *crack initiation* memiliki butiran lebih halus dibandingkan dengan *early crack propagation*. Gambar 4.4. (c) merupakan hasil gambar menggunakan *stereomicroscope* dengan perbesaran 10 kali, dari gambar tersebut menunjukkan awal penjalaran patah (*early crack propagation*) ditunjukkan tanda panah yang kemudian arah retakaannya menjalar ke samping kiri. Hal ini terlihat pada *early crack propagation* memiliki butir yang lebih kasar jika dibandingkan dengan *initial crack*. Gambar 4.4. (d) merupakan hasil gambar menggunakan *stereomicroscope* dengan perbesaran 10 kali, dari gambar tersebut menunjukkan akhir penjalaran patahan (*end propagation*). Hal ini terlihat pada *end propagation* memiliki butir permukaan yang lebih kasar jika dibandingkan dengan *early crack propagation*, hal ini disebabkan karena mendapatkan pembebanan yang statis. Pada skala makro juga ditunjukkan adanya perubahan tinggi pada penampang komponen. Meninjau hasil pengamatan makro dengan menggunakan *stereomicroscope* tampak patahan yang terjadi pada permukaan *crossbar* dapat dikategorikan patah getas.

4.1.5 Hasil Pengujian SEM (Scanning Electron Microscope) pada Crossbar yang Gagal

Berdasarkan pengamatan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan perbesaran yang lebih besar dari kamera DSLR dan *stereomicroscope* sehingga retakan tampak jelas. Gambar 4.5 (a) merupakan hasil foto permukaan dari *crossbar* yang mengalami *crack* difoto menggunakan bantuan Kamera DSLR dan gambar 4.5 (b), (c), dan (d) menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan perbesaran 500 kali.

Gambar 4.5 (a) merupakan hasil foto permukaan dari *crossbar* yang mengalami *crack* difoto menggunakan bantuan Kamera DSLR, dari gambar 4.5 (a) terlihat bahwa terdapat 3 bagian yaitu *initial crack*, *early propagation*, dan *end*

propagation. Gambar 4.5 (b) memperlihatkan daerah *initial crack* pada *crossbar* dengan menggunakan SEM perbesaran 500x. Di tandai dengan adanya permukaan yang lebih rendah dibandingkan permukaan yang lain. Daerah ini diambil tepat pada daerah kuping *crossbar*, yang mendapatkan pembebanan paling besar pada saat *crossbar* bekerja. Dari sini terlihat bahwa *crossbar* telah mengalami *fatigue crack brittle* dengan arah retakan yang tegak lurus dengan pembebanan. Pada daerah awal retak ini tidak terdapat *beachmark* dan striasi yang berarti komponen ini menerima beban dinamis lebih sedikit dibandingkan beban statisnya. Hal ini sesuai dengan sifat material yang memiliki kekuatan dan kekerasan yang tinggi.



Gambar 4. 4 Observasi SEM bagian yang mengalami *crack* (a) Potongan spesimen yang mengalami *crack* (b) *initial crack* (c) *early propagation* (d) *end propagation*



Gambar 4.5. (c) memperlihatkan daerah perambatan retak (*propagation*) pada *crossbar* yang mengalami kegagalan dimana terlihat adanya perbedaan ketinggian secara nyata dan juga warna yang lebih gelap dibandingkan daerah awal retak yang dapat dilihat pada gambar 4.5 (b) dan dengan SEM pada perbesaran 500x pada gambar 4.5. (c) daerah ini terlihat adanya sisa butiran butiran kasar yang merupakan ciri dari patah getas. Disini terlihat dengan Jelas patahan yang melintasi butiran atau patah transgranular. Patah Transgranular Ini ditandai dengan adanya pola patahan dipermukaan yang memiliki bentuk butir butir yang kasar dan tersebar acak di permukaan patahan. Namun pada gambar 4.5. (c) permukaan terlihat halus hal ini dikarenakan pada daerah ini *clinker* masuk dan menggerus permukaan *crossbar* yang patah sehingga menyebabkan permukaan pada daerah *propagation* menjadi halus. Gambar 4.5. (d) menunjukkan daerah dari akhir perambatan (*end propagation*) pada *crossbar* yang mengalami kegagalan. Dengan permukaan yang kasar dengan butir-butir yang kasar (*coarse grains*) yang terlihat pada hasil pengamatan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)* pada Gambar 4.5. (d) hal ini mengindikasikan bahwa rambatan ini adalah rambatan akhir pada saat komponen tidak lagi bisa menerima beban yang diberikan dengan luasan penampang yang tersisa sehingga terjadi kegagalan pada komponen ini.

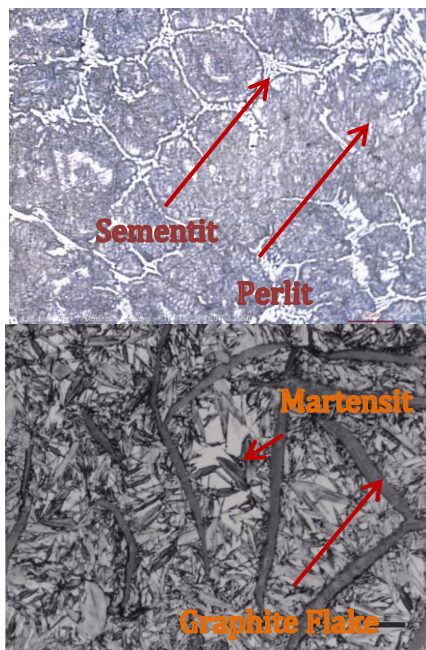
4.1.6 Hasil Pengamatan Struktur Mikro (Metalografi)

Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk melihat perubahan yang terjadi pada spesimen yang telah diberikan perlakuan panas berupa *hardening* dan *tempering* dengan beberapa variabel berbeda. Berikut adalah struktur mikro material *crossbar* sebelum diberi perlakuan panas.

Pada gambar 4.6 dapat dilihat bahwa struktur mikro dari material ini terdiri dari perlit dan sementit. Bagian yang ditunjukkan berwarna lebih terang adalah sementit dan bagian yang berwarna lebih gelap adalah perlit. Hal ini membuktikan

bahwa material ini termasuk kedalam baja hypereutektoid. (Aisyah, 2011)

Jika dibandingkan dengan material standar dari *crossbar*, besi tuang kelabu, maka struktur mikronya berbeda. Struktur mikro besi tuang kelabu terdiri dari perlit, martensit dan serpihan grafit (*graphite flake*). Dapat disimpulkan bahwa material standar dari *crossbar* ini lebih keras karena memiliki martensit. Martensit merupakan struktur mikro yang sangat keras. (Subardi, 2011)



Gambar 4.6 Struktur mikro (a) Material *crossbar* dan (b) besi tuang kelabu

4.1.7 Hasil Pengujian Kekerasan Brinnel Material yang Gagal

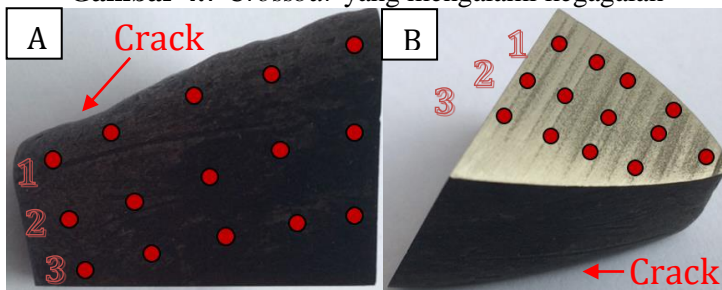
Pengujian *hardness* ini dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan pada *crossbar* yang mengalami kegagalan. Gambar 4.7 merupakan gambar dari *crossbar* yang mengalami



kegagalan berupa crack, gambar 4.8 (a) dan Gambar 4.8 (b) merupakan daerah yang dekat dengan *crack*, dan Gambar 4.9 merupakan spesimen *crossbar* yang diambil jauh dari letak spesimen *crack*. Pengujian ini menggunakan indentasi sebanyak 10-15 titik secara merata, indentasi dilakukan pada daerah yang dekat dan jauh dari patahan dengan beban sebesar 187.5 kgf. Pembagian daerah indentasi dapat dilihat pada gambar 4.11 dan gambar 4.12.

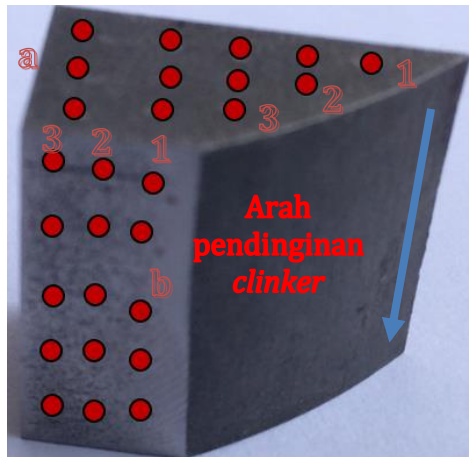


Gambar 4.7 Crossbar yang mengalami kegagalan



Gambar 4.8 (a) Daerah indentasi sejajar dekat dengan *crack* (b) Daerah indentasi tegak lurus dekat dengan *crack*

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



Gambar 4.9 (a) Daerah indentasi tegak lurus arah pendinginan
(b) Daerah indentasi sejajar arah pendinginan

Dari tabel 4.3 dan 4.4 bisa terlihat bahwa nilai kekerasan di daerah sejajar dengan *crack* memiliki rata-rata sebesar 405 BHN, di daerah tegak lurus dengan *crack* memiliki rata-rata sebesar 361,8 BHN, di daerah *crossbar* sejajar dengan arah pendinginan memiliki rata-rata sebesar 365,4 BHN dan di daerah tegak lurus dengan arah pendinginan memiliki rata-rata sebesar 355,8 BHN. Dari sini bisa dilihat bahwa komponen ini mengalami kenaikan kekerasan pada daerah yang mengalami patahan bila dibandingkan dengan daerah yang berada jauh dari patahan. Selain itu adanya perbedaan temperatur pada saat bekerja juga mempengaruhi kekerasan pada *crossbar*. Pada tabel 4.3 dan tabel 4.4 diperlihatkan nilai kekerasan yang didapatkan pada daerah dekat dengan *crack* secara sejajar dan tegak lurus dan daerah *crossbar* sejajar dan tegak lurus dengan arah pendinginan.

Pada tabel 4.5 menunjukkan bahwa kekerasan yang sesuai dengan material *crossbar* adalah *grey cast iron* dengan type *heat treat hardened* yang memiliki nilai kekerasan sebesar 480-550 BHN dimana nilai kekerasannya jauh berbeda dari



crossbar yang ada di PT. Semen Indonesia yang memiliki nilai kekerasan rata-rata tertinggi sebesar 405 BHN.

Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian Kekerasan Dekat dari *crack*

Daerah Indentasi	Sejajar dengan crack			Tegak lurus dengan crack		
	1	2	3	1	2	3
1	408	390	370	-	365	-
2	416	398	379	368	368	368
3	400	384	366	360	358	354
4	402	386	368	363	360	362
5	399	380	360	355	358	355
Average	405	387,6	368,6	361,5	361,8	359,75

Tabel 4.4. Data Hasil Pengujian Kekerasan Jauh dari *crack*

Daerah Indentasi	Tegak lurus arah pendinginan			Sejajar arah pendinginan		
	1	2	3	1	2	3
1	360	-	-	362	360	358
2	364	325	-	358	358	358
3	368	368	354	348	352	355
4	370	373	377	352	354	352
5	365	370	358	350	355	353
Average	365,4	359	363	354	355,8	355,2

Tabel 4.5 Kekerasan besi tuang kelabu menurut ASTM A48

Type of Gray Cast Iron	Matrix Microstructure Around Flake Graphite	Brinell Hardness (BHN)
Soft-Annealed	All Ferrite	110-140
Ordinary	Pearlite and Ferrite	140-200
Higher Strength	Fine Pearlite	200-270
Alloyed-Arcicular	Bainite	260-350
Austenitic (Ni-Resist)	Austenite	140-160
Heat Treat Hardened	Martensite	480-550
Hardened and Tempered	Tempered Martensite	250-450
Chilled (White Iron)	Pearlite and Carbides	400-500

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



4.2 Analisis Data Material *Crossbar* setelah *Heat Treatment*

Setelah dilakukan analisis mengenai kegagalan yang terjadi pada *crossbar*, dilakukan perlakuan panas berupa *hardening* dan *tempering* pada material *crossbar*. Hardening dilakukan pada temperatur 950°C dengan waktu tahan 30 menit. Untuk tempering dilakukan dengan variasi temperatur 250°C, 300°C, 350°C dan 400°C dengan variasi waktu tahan 60 dan 120 menit. Untuk memudahkan dalam menganalisis, spesimen dengan variasi temperatur dan waktu tahan tempering berbeda diberikan kode seperti pada tabel 4.6

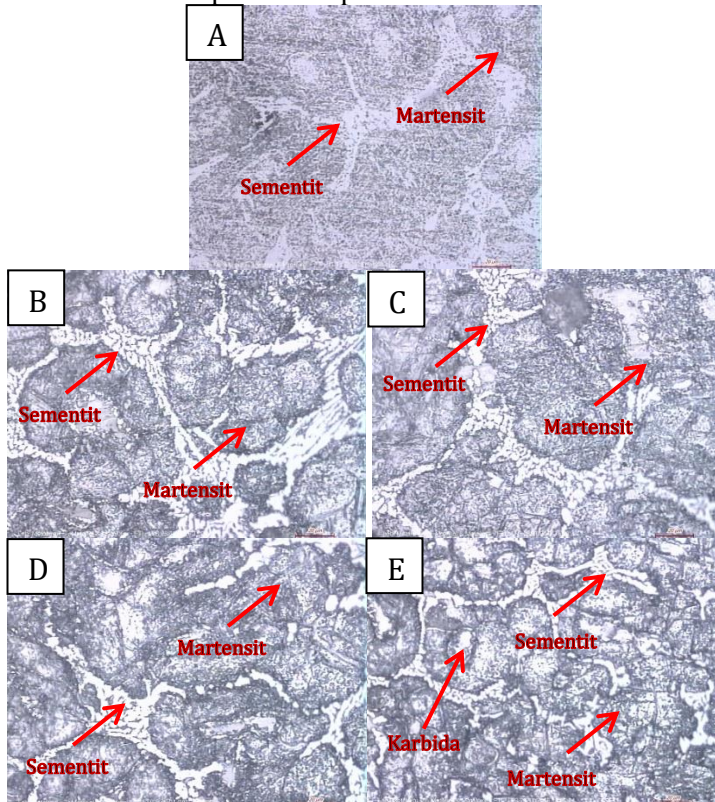
Tabel 4.6 Kode Penamaan Spesimen

Kode Spesimen	Jenis Perlakuan panas
Failure Crossbar	Tanpa perlakuan panas
H	<i>Hardening</i> tanpa <i>tempering</i>
HT250t60	<i>Hardening</i> lalu <i>tempering</i> 250°C dengan waktu tahan 60 menit
HT300t60	<i>Hardening</i> lalu <i>tempering</i> 300°C dengan waktu tahan 60 menit
HT350t60	<i>Hardening</i> lalu <i>tempering</i> 350°C dengan waktu tahan 60 menit
HT400t60	<i>Hardening</i> lalu <i>tempering</i> 400°C dengan waktu tahan 60 menit
HT250t120	<i>Hardening</i> lalu <i>tempering</i> 250°C dengan waktu tahan 120 menit
HT300t120	<i>Hardening</i> lalu <i>tempering</i> 300°C dengan waktu tahan 120 menit
HT350t120	<i>Hardening</i> lalu <i>tempering</i> 350°C dengan waktu tahan 120 menit
HT400t120	<i>Hardening</i> lalu <i>tempering</i> 400°C dengan waktu tahan 60 menit



4.2.1 Hasil Uji Metalografi

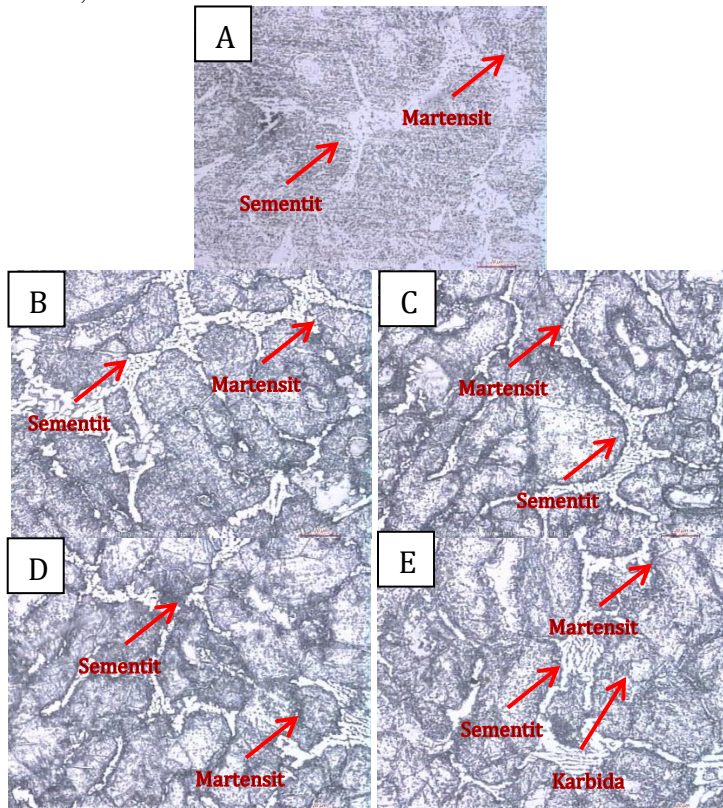
Setelah diberi perlakuan panas berupa *hardening* pada temperatur 950°C dan *tempering* dengan variasi pada temperatur dan waktu tahan, spesimen diuji metalografi dengan perbesaran 500x untuk melihat perubahan pada struktur mikro.



Gambar 4.10 Struktur mikro spesimen (a) H (b) HT250t60 (c) HT300t60 (d) HT350t60 (e) HT400t60

Gambar 4.10 (a) menunjukkan struktur mikro baja material *crossbar* yang diberi perlakuan *hardening* pada temperatur 950°C tanpa *tempering*. Gambar 4.10 menunjukkan struktur mikro material *crossbar* yang di *hardening* dan di *tempering* pada

temperatur (b) 250°C, (c) 300°C, (d) 350°C dan (e) 400°C dengan waktu tahan sama yaitu selama 60 menit. Dari keempat spesimen yang diberikan perlakuan setelah tempering, hasil struktur mikronya sama seperti spesimen yang hanya diberi perlakuan hardening. Dari uji struktur mikro didapatkan hasil martensit dan sementit untuk spesimen yang ditempering pada temperatur HT250t60, HT300t60 dan HT350t60. Pada hasil uji struktur mikro spesimen HT400t60, didapatkan struktur mikro berupa sementit, martensit dan karbida.



Gambar 4.11 Struktur mikro spesimen (a) H (b) HT250t120 (c) HT300t120 (d) HT350t120 (e) HT400t120



Gambar 4.11 (a) menunjukkan struktur mikro baja material *crossbar* yang diberi perlakuan *hardening* pada temperatur 950°C tanpa *tempering*. Gambar 4.11 menunjukkan struktur mikro material *crossbar* yang di *hardening* dan di *tempering* pada temperatur (b) 250°C, (c) 300°C, (d) 350°C dan (e) 400°C dengan waktu tahan sama yaitu selama 120 menit. Dari keempat spesimen yang diberikan perlakuan setelah tempering, hasil struktur mikronya sama seperti spesimen yang hanya diberi perlakuan *hardening*. Dari uji struktur mikro didapatkan hasil martensit dan sementit untuk spesimen yang ditempering pada temperatur HT250t120, HT300t120 dan HT350t120. Pada hasil uji struktur mikro spesimen HT400t120, didapatkan struktur mikro berupa sementit, martensit dan karbida.

4.2.2 Hasil Uji Kekerasan Material *Crossbar* Setelah Diberi Perlakuan Panas

Uji kekerasan dilakukan pada tiap spesimen yang telah diberi perlakuan panas berupa *hardening* dan *tempering*. Uji kekerasan dilakukan pada tiga titik pada setiap spesimen. Hasil uji kekerasan ditampilkan pada Tabel 4.7.

Dapat dilihat pada tabel 4.7 , kekerasan awal dari material *crossbar* tanpa perlakuan adalah 405 BHN. Setelah di *hardening* pada temperatur 950°C dan waktu tahan 30 menit, kekerasan yang didapatkan adalah sebesar 601,34 BHN. Setelah ditempering didapatkan nilai kekerasan terbesar adalah pada tempering dengan temperatur 250°C dan waktu tahan 60 menit ataupun 120 menit. Setelah mengalami proses tempering nilai kekerasan dari kedelapan spesimen menurun hal ini dikarenakan *tempering* bertujuan untuk mengembalikan sebagian keuletan/ketangguhan, berakibat turunnya kekerasan, dan melepas tegangan dalam untuk memperoleh keuletan yang lebih baik. (Donald S Clark 1962)

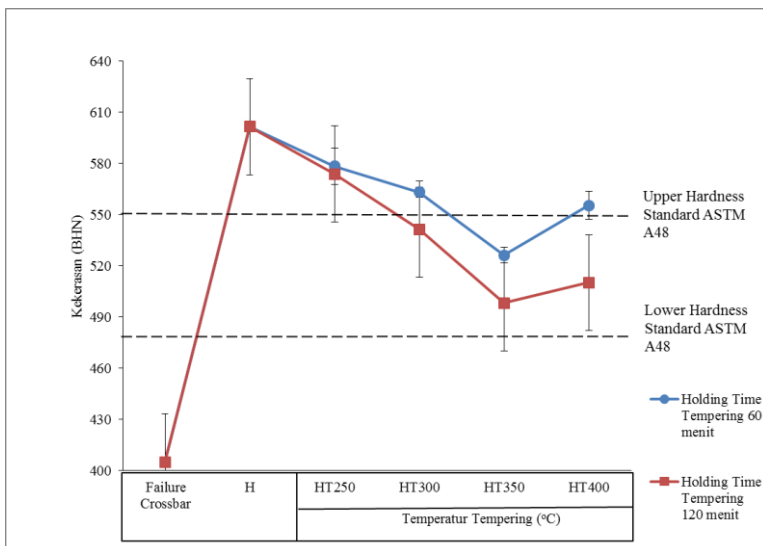
Akan tetapi dapat dilihat pada gambar 4.12, pada variabel temperatur 400°C dengan waktu tahan 60 ataupun 120 menit, terjadi kenaikan kekerasan jika dibandingkan dengan hasil uji kekerasan untuk spesimen dengan tempering 350°C. Hal ini



disebabkan adanya sifat *secondary hardness*. (Mazurkiewicz, 2007)

Tabel 4.7 Hasil uji kekerasan material *crossbar* setelah diberi perlakuan panas

Spesimen	Rata – rata Kekerasan (BHN)
<i>Failure Crossbar</i>	405
H	601,34
HT250t60	578,34
HT300t60	563
HT350t60	526
HT400t60	555,34
HT250t120	573,67
HT300t120	541,34
HT350t120	498
HT400t120	510



Gambar 4.12 Grafik hasil uji kekerasan material *crossbar* setelah diberi perlakuan panas



4.3 Pembahasan

Setelah dilakukan beberapa pengujian pada material *crossbar clinker cooler*, didapatkan bahwa kegagalan yang terjadi pada material ini adalah kesalahan dalam pemilihan material. Hal ini ditinjau dari segi struktur mikro dan kekerasan material tersebut.

Material standar yang digunakan untuk *crossbar clinker cooler* ini adalah besi tuang kelabu (*gray cast iron*) dengan standar ASTM A48. Sedangkan berdasarkan hasil uji komposisi (OES), material yang didapatkan tidak sesuai dengan standar. Kandungan unsur karbon (C) pada material uji lebih tinggi daripada material standar. Hal ini menunjukkan bahwa material uji memiliki sifat kekerasan yang lebih rendah dibandingkan material standar. Selain itu, material *crossbar* PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk juga memiliki kelebihan dengan adanya unsur kromium dengan komposisi tinggi sebesar 16,34%. Kromium merupakan unsur pembentuk karbida dan penstabil ferrit yang baik, dengan adanya kromium dapat menaikkan temperatur austenisasi karena kromium adalah unsur pembentuk karbida dan penstabil ferrit. Kromium juga dapat meningkatkan *hardenability* pada material *crossbar* PT. Semen Indonesia Tbk. Ditinjau dari komposisi kromium tersebut untuk perlakuan panas dibutuhkan temperatur austenisasi lebih tinggi dari temperatur A1. Kandungan unsur Ni, Mn dan Mo lebih tinggi daripada material standar. Kandungan unsur – unsur Ni, Mn, Mo dan Cr dapat meningkatkan *hardenability* dari material *crossbar*. Perbedaan komposisi ini mengakibatkan material *crossbar* memiliki kekerasan yang lebih rendah sehingga lebih mudah mengalami *crack*. Hal tersebut menjadi salah satu kegagalan yang terjadi pada *crossbar* dan memperpendek umur *crossbar* yang semestinya 2 tahun. (ASTM A48, 1999)

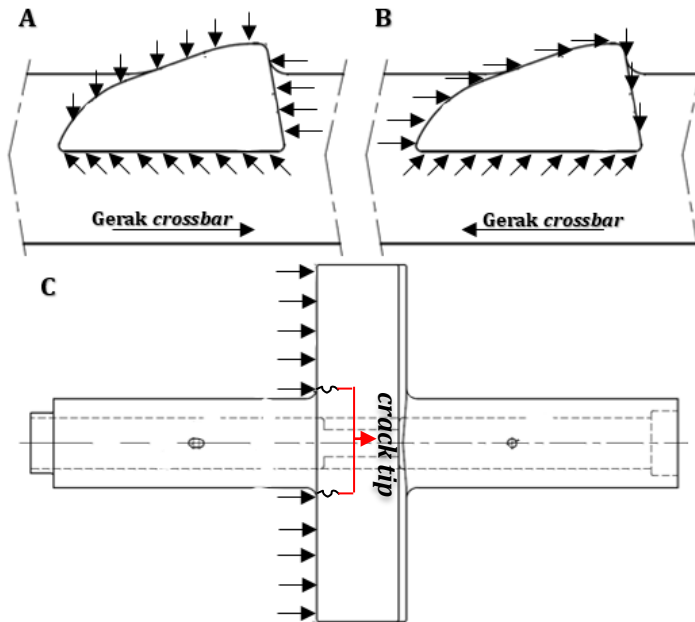
Setelah dilakukan uji fraktografi, didapatkan tiga bagian dari *crack*, yaitu *initial crack*, *propagation* dan *final crack*. *Initial Crack*, merupakan retak awal yang ditandai dengan permukaan yang terlihat terang dan halus. Awal retak biasanya dimulai dari



permukaan. Hal ini terjadi karena permukaan menerima beban terbesar dan paling memungkinkan terjadinya konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh adanya perubahan dimensi pada permukaan atau proses pengerjaan tertentu pada material. Adanya cacat dalam juga menyebabkan konsentrasi tegangan. *Crack Propagation*, merupakan penjararan retak dengan permukaan yang berwarna lebih gelap dan adanya perbedaan ketinggian yang terlihat secara makro bila dibandingkan dengan daerah initial crack. *Final Crack*, merupakan daerah rambatan akhir dengan permukaan yang kasar dengan butir-butir yang kasar (*coarse grains*). (Nishida, 1992)

Kemudian dilakukan uji metalografi pada material *crossbar* yang mengalami kegagalan atau *failure crossbar*, didapatkan bahwa struktur mikro material ini terdiri dari perlit dan sementit, dimana hal tersebut sangat berbeda dengan struktur mikro dari besi tuang kelabu yang terdiri dari perlit, martensit dan *graphite flake*. Perbedaan struktur mikro ini menjadi salah satu alasan kegagalan yang terjadi, dimana *crossbar* yang seharusnya memiliki umur pakai 2 tahun mengalami kegagalan setelah 8 bulan digunakan. (ASTM A48, 1999)

Ditinjau dari segi kekerasan, material ini tidak sesuai dengan spesifikasi kekerasan material standar dari *crossbar*. Rata – rata kekerasan yang didapatkan adalah 405 BHN, sedangkan standar kekerasan dari material *crossbar* adalah 480 – 550 BHN yang merupakan standar kekerasan dari besi tuang kelabu. Kekerasan yang kurang dari spesifikasi ini mengakibatkan umur dari *crossbar* yang lebih pendek dikarenakan ketahanannya terhadap beban yang lebih rendah. (ASTM A48, 1999)



Gambar 4.13 Ilustrasi persebaran gaya pada *crossbar* (a) Pada saat mendorong *clinker* (b) Pada saat kembali ke posisi semula (c) Persebaran gaya tampak atas

Mekanisme kegagalan dari *crossbar* dapat ditinjau dari segi desain *crossbar* dan cara kerja dari *crossbar* tersebut. Bagian sayap dari *crossbar* didesain untuk tidak menyentuh bagian *air distribution plate* atau bagian dasar dari *cooling chamber*. Selain ditinjau dari segi desain *crossbar*, mekanisme kegagalan dapat ditinjau dari segi cara kerja *crossbar*. Pada gambar 4.16 dapat dilihat persebaran gaya pada bagian sayap *crossbar*. Dapat dilihat dari kedua gambar tersebut bahwa kegagalan disebabkan karena *clinker* yang menyisip ke bawah sayap sehingga menyebabkan gaya gesek dan gaya tekan keatas. Pada gambar 4.13 (a) dapat dilihat bahwa bagian dengan luas permukaan yang lebih besar mendorong *clinker* menuju ke arah *hammer crusher*. Hal ini

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



menyebabkan gaya tekan yang berlebih disaat *crossbar* bergerak secara *linear*. Selain itu beban *clinker* pada permukaan *crossbar* menyebabkan gaya tekan yang berlebih (*overload*). Untuk gambar 4.13 (b) dan (c) bagian sayap yang memiliki luas yang lebih kecil bergerak ke posisi awalnya. Bagian yang memiliki luas permukaan lebih kecil ini didesain aordinamis agar *clinker* tidak terdorong kembali *rotary kiln*. Pada saat gerakan kembali ini, *crossbar* juga mengalami gaya tekan yang berlebih yang diakibatkan oleh pembebanan *clinker* yang lebih besar dibandingkan dengan pembebanan *clinker* pada saat mendorong *clinker*. Akibat dari gaya – gaya yang bekerja pada *crossbar* secara terus menerus, *crossbar* mengalami kegagalan berupa *crack*.

Setelah diketahui faktor dari kegagalan, material *crossbar* diberikan perlakuan panas dengan tujuan mendapatkan kekerasan yang sesuai dengan material standar yang digunakan untuk *crossbar*. Perlakuan panas yang diberikan berupa *hardening* dan *tempering*. Pada setiap spesimen yang diberikan perlakuan panas dengan variabel berbeda, hasil struktur mikro yang didapatkan sama. Dari keempat spesimen yang diberikan perlakuan setelah *tempering*, hasil struktur mikronya sama seperti spesimen yang hanya diberi perlakuan *hardening*. Dari uji struktur mikro didapatkan hasil martensit dan sementit untuk spesimen yang ditempering pada temperatur HT250t60, HT300t60 dan HT350t60. Pada hasil uji struktur mikro spesimen HT400t60, didapatkan struktur mikro berupa sementit, martensit dan karbida. Dari uji struktur mikro didapatkan hasil martensit dan sementit untuk spesimen yang ditempering pada temperatur HT250t120, HT300t120 dan HT350t120. Pada hasil uji struktur mikro spesimen HT400t120, didapatkan struktur mikro berupa sementit, martensit dan karbida.

Setelah diamati struktur mikronya, dilakukan uji kekerasan pada tiap spesimen yang telah diberi perlakuan pans berupa *hardening* dan *tempering*. Sebelum dilakukan *tempering*, rata – rata kekerasan dari material *crossbar* adalah 601,34 BHN.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



Untuk spesimen HT250t60 dan AISI D2 HT250t120 didapatkan kekerasan senilai 578,34 BHN dan 573,67 BHN. Untuk spesimen HT300t60 dan AISI D2 T300t120 didapatkan kekerasan senilai 563 BHN dan 541,33 BHN. Untuk spesimen HT350t60 dan HT350t120 didapatkan kekerasan senilai 526 BHN dan 498 BHN. Untuk spesimen HT400t60 dan HT400t120 didapatkan kekerasan senilai 555,34 BHN dan 510 BHN. Dari delapan spesimen yang diamati, dapat dilihat bahwa kekerasan spesimen dengan waktu tahan 60 menit akan lebih besar daripada spesimen dengan waktu tahan 120 menit dengan temperatur yang sama. Hal ini membuktikan bahwa waktu tahan mempengaruhi kekerasan dari baja karena terjadi perubahan martensit menjadi fase temper martensit. (Suherman, 2011)

Pada grafik hasil uji kekerasan, dapat dilihat bahwa terjadi kenaikan kekerasan pada temperatur 400°C. Hal ini disebabkan karena adanya *secondary hardening* dari material *crossbar* saat *tempering*. *Secondary hardening* diakibatkan adanya kandungan unsur pembentuk dan penstabil karbida. Pada saat proses *tempering* terjadi akibat terbentuknya karbida yang mengakibatkan kekerasan justru naik setelah dilakukan *tempering*. Terbentuknya karbida terjadi akibat adanya unsur – unsur pembentuk karbida dalam jumlah yang tinggi, seperti krom, sehingga ketika diberi perlakuan *tempering* pada temperatur tertentu terdapat energi yang cukup untuk membentuk karbida. (ASM, 2002)

Dengan meningkatnya kekerasan dari material *crossbar* melebihi material standar, dapat disimpulkan bahwa kekuatan dari material ini juga dapat meningkat. Hal ini dapat memperpanjang umur pemakaian dari *crossbar* pada *clinker cooler*.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan serangkaian percobaan yang telah dilakukan ada beberapa kesimpulan mengenai keausan *crossbar* pada *clinker cooler* antara lain sebagai berikut :

1. Faktor yang menyebabkan terjadinya kegagalan berupa *crack* komponen *crossbar* pada *clinker cooler* yaitu kesalahan dalam pemilihan material yang ditinjau dari desain *crossbar*, komposisi material, kekerasan material dan kinerja *crossbar* yang mengakibatkan *fatigue brittle failure*.
2. Mekanisme kegagalan dikarenakan adanya beban tekan dari bawah oleh *clinker* yang menyisip pada rongga antara sayap dan *air distribution plate*, dan beban tekan dari *clinker* yang terpusat hanya pada *crossbar* di bagian tengah *cooling chamber*.
3. Solusi dari kegagalan ini yaitu dengan memberikan perlakuan panas berupa *hardening dan tempering* pada komponen *crossbar* agar dapat meningkatkan kekerasan dan juga kekuatannya. Jenis perlakuan panas yang dapat menghasilkan kekerasan yang sesuai dengan standar kekerasan ASTM A48 adalah *hardening dan tempering 300°C dengan waktu tahan 120 menit*, *hardening dan tempering 350°C dengan waktu tahan 120 menit*, *hardening dan tempering 400°C dengan waktu tahan 120 menit*, dan *hardening dan tempering 350°C dengan waktu tahan 60 menit*.

5.2 Saran

1. Menggunakan unit perata *clinker* sesaat setelah *clinker* keluar dari *rotary kiln* agar dapat meratakan beban *clinker* pada *crossbar* dan pendinginan lebih efisien.



2. Melakukan proses *heat treatment* pada komponen *crossbar* sebelum dipasang pada *clinker cooler* agar meningkatkan kekerasan pada *crossbar*.
3. Menggunakan produk lain yang sesuai dengan standar *crossbar* dan yang lebih murah serta efisien dalam penggunaannya.

DAFTAR PUSTAKA

- _____. 2002. *ASM Handbook Vol.9 Metallographic and Microstructure*. Material Park. Ohio. USA. ASM International.
- _____. 2002. *ASM Handbook Vol.12 Fractography*. Material Park. Ohio. USA. ASM International.
- _____. 2002. *ASM Handbook Vol.19 Fatigue and Fracture*. Material Park. Ohio. USA. ASM International.
- Anwar, Khairil. 2011. *Analisis Perpindahan Panas Grate Cooler Industri Semen*. Palu: Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Tadulako.
- Araim, Attaullah. (Ayooq). 1999. "Heat Treatment and Toughness Behavior of Tool Steels (D2 and H13) for Cutting Blades."
- Avner, Sidney H. 2004. *Introduction to Physical Metallurgy*. New York: McGraw Hill.
- Callister, William. 2007. *Material Science and Engineering An Introduction*. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Campbell, F.C. 2008. *Elements of Metallurgy and Engineering*. New York: ASM International.
- Dieter, George E. 1987. *Metalurgi Mekanik*. Jakarta : Erlangga.
- Donald S Clark, Varney R Wilbur. 1962. *Physical Metallurgy for Engineers*. California: Litton Educational Publishing Inc.
- Firdaus, Apriyadi. 2007. *Proses Pembuatan Semen Pada PT. Holcim Indonesia Tbk*. Banten: Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- FLSmidth. 2016. *about us : FLSmidth*. Oktober 3.
<http://www.flsmidth.com/en-US/Industries/Categories/Products/Pyroprocessing/FLSmidth+Cross-Bar+Cooler/FLSmidth+Cross-Bar+Cooler>.
- LI Hong-ying, LI Jun HU Ji-dong, Guang Chen, Xiong-jie Sun. 2013. *Effect of tempering Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 6150 Steel*. Journal Central South University.

- Mazurkiewicz, J. 2007. *Comparison Of The Secondary Hardness Effect After Tempering Of The Hot-Work Tool Steels*. Polandia: Silesian University of Technology.
- Mizhar, Susri. 2011. "Pengaruh Perbedaan Kondisi Tempering Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan dari Baja AISI 4140." *Jurnal Dinamis* 23.
- Murtiono, Arief. 2012. *Pengaruh Quenching dan Tempering Terhadap Kekerasan dan Kekuatan Tarik Serta Struktur Mikro Baja Karbon Sedang Untuk Mata Pisau Pemanen Sawit*. Sumatera: Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara.
- Nishida, Shin-ichi. 1992. *Failure Analysis in Engineering Application*. Jordan Hill. Oxford. Butterworth-Heinemann Ltd.
- R. Brooks, Charlie and Choudhury, Ashok. 2002. *Failure Analysis of Engineering Materials*. New York : McGraw-Hill.
- Rochman Rochiem, Hariyati Purwaningsih, Edwin Setiawan. 2009. *Pengaruh Proses Perlakuan Panas Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Baja AISI 310 S*. Surabaya: Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Setiyana, Budi. 2007. "ANALISIS UNJUK KERJA GRATE CLINKER COOLER PADA PROSES PRODUKSI SEMEN." 20.

XXV

REF DRAW FOR SKETCH

FOR APPROVAL

SURFACE FINISHES		SURFACE ROUGHNESS	
mm	μm	mm	μm
50	0.8	0.8	0.8
25	0.4	0.4	0.4
12.5	0.2	0.2	0.2
6.3	0.1	0.1	0.1
3.2	0.05	0.05	0.05
1.6	0.025	0.025	0.025

NOTE: All dimensions are in millimeters unless otherwise specified.

PT. HANSA PRATAMA Foundry & Engineering

[illegible]

2. Hasil Uji Komposisi Unsur (OES)



**BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN INDUSTRI
BALAI RISET DAN STANDARDISASI INDUSTRI SURABAYA
LABORATORIUM PENGUJIAN DAN KALIBRASI
BARISTAND INDUSTRI SURABAYA**

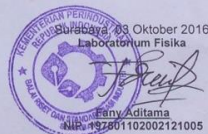
Jl. Jagir Wonokromo No. 360 Surabaya (60244), Telp. (031) 8410054, Fax. (031) 8410480
<http://baristandsurabaya.kemenperin.go.id/>

Nomor Analisa : P 5576 s/d P 5578
Jenis Sampel : Besi Tuang
Kode : A, B, C

No	Parameter Uji Komposisi Kimia Logam	Satuan	Hasil Uji			Methoda uji
			P 5576 (A)	P 5577 (B)	P 5578 (C)	
1	Si	%	0,37379	2,4849	0,61983	JIS G 1253 : 2002 Cara uji komposisi kimia
2	Mn	%	0,77582	0,93132	2,0322	
3	P	%	0,01986	0,06462	0,05978	
4	S	%	0,00606	0,02336	0,01116	
5	Cu	%	0,03701	0,56583	0,15006	
6	Ni	%	0,39966	3,5939	7,6548	
7	Cr	%	1,9148	16,344	13,387	
8	Mo	%	0,22922	0,33403	0,22436	
9	Al	%	0,05568	0,10638	0,01166	
10	Carbon	%	0,59650	1,1742	0,02916	

Catatan :

- Sampel diuji sesuai permintaan.
- Sampel diuji dengan alat Optical Emission Spectrometer



Halaman 2 dari 2
Page 2 of 2

Perhatian :
Laporan Hasil Uji hanya berlaku untuk contoh diatas
Laporan Hasil Uji ini tidak boleh digandakan
KodeDok : FM - 7.09.02 1/0

3. Komposisi dan Sifat Mekanik *Gray Cast Iron*

Table 1. Composition Range for Un-Alloyed Cast Irons

Iron Family	Carbon	Silicon	Manganese	Sulfur	Phosphorus
Gray	2.5-4.2	1.0-3.0	0.15-1.0	0.02-0.25	0.02-1.0
Ductile	3.0-4.0	1.8-3.0	0.1-1.0	0.01-0.03	0.01-0.1
CGI	2.5-4.0	1.5-3.0	0.10-1.0	0.01-0.03	0.01-0.1
Malleable	2.2-2.8	1.2-1.9	0.15-1.2	0.02-0.2	0.02-0.2
White	1.8-3.6	0.5-2.0	0.15-0.8	0.02-0.2	0.02-0.2

Table 3. Property Comparisons for Gray Iron Classes

Property	Class 25 (as-cast)	Class 30 (as-cast)	Class 30 (annealed)	Class 35 (as-cast)	Class 40 (as-cast)
Brinell Hardness	187	207	109	212	235
Tensile Strength	29.9 ksi (206 MPa)	33.7 ksi (232 MPa)	20.6 ksi (142 MPa)	34.8 ksi (240 MPa)	41.9 ksi (289 MPa)
Modulus of Elasticity	16.6 Msi (114 GPa)	17.0 Msi (117 GPa)	14.5 Msi (100 GPa)	18.0 Msi (124 GPa)	18.2 Msi (126 GPa)
Tensile Poisson's Ratio	0.29	0.19	0.21	0.22	0.24
Compression Poisson's Ratio	0.27	0.28	0.26	0.28	0.23
Compression-to-Tensile Strength Ratio	3.68	3.84	4.05	3.63	3.71

Table 3. Hardness Ranges for Gray Irons

Type of Gray Iron	Matrix Microstructure around Flake Graphite	Brinell Hardness
Soft-Annealed	All Ferrite	110-140
Ordinary	Pearlite and Ferrite	140-200
Higher Strength	Fine Pearlite	200-270
Alloyed-Acicular	Bainite	260-350
Austenitic (Ni-Resist)	Austenitite	140-160
Heat Treat Hardened	Martensite	480-550
Hardened and Tempered	Tempered Martensite	250-450
Chilled (white iron)	Pearlite and Carbides	400-500

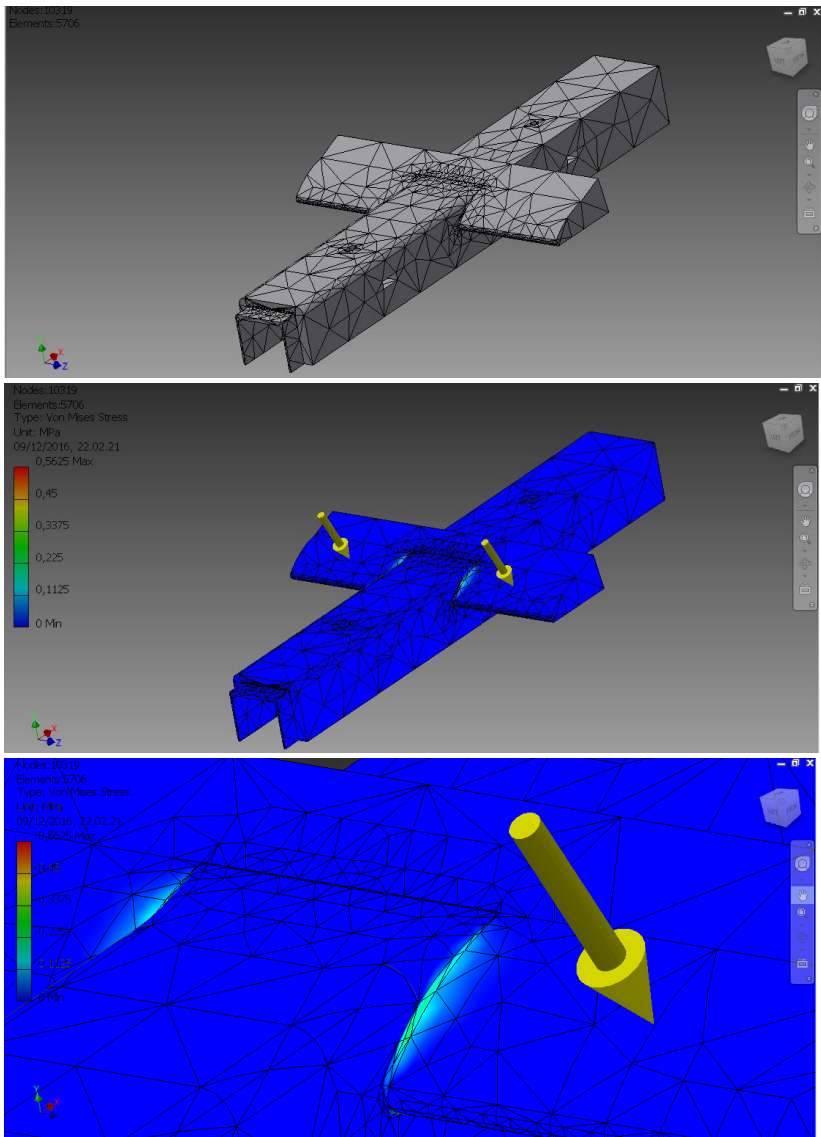
4. Hasil Uji Kekerasan Sebelum Perlakuan Panas

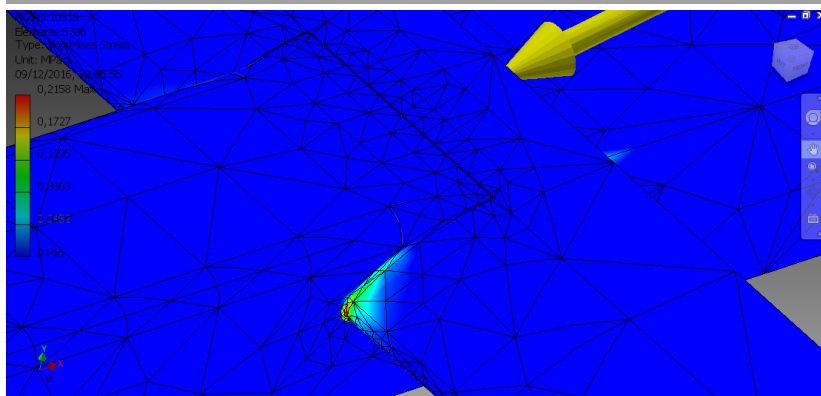
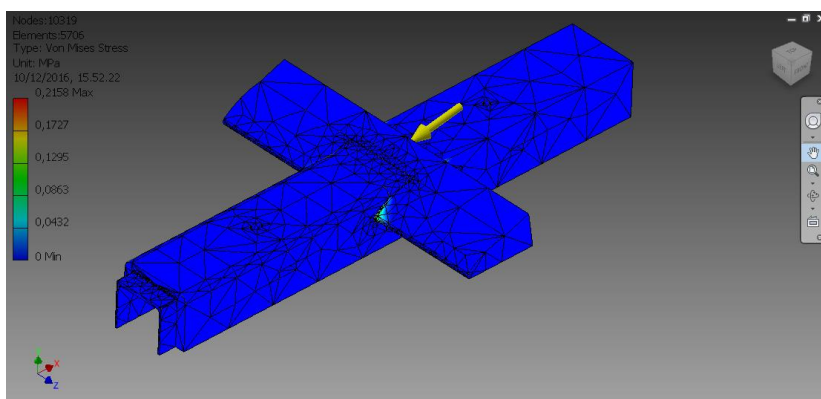
Daerah Indentasi	Tegak Lurus dekat Crack			Sejajar dekat Crack			Tegak lurus Arah Pendinginan			Sejajar Arah Pendinginan		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	408	390	370	-	365	-	360	-	-	362	360	358
2	416	398	379	368	368	368	364	325	-	358	358	358
3	400	384	366	360	358	354	368	368	354	348	352	355
4	402	386	368	363	360	362	370	373	377	352	354	352
5	399	380	360	355	358	355	365	370	358	350	355	353
Average	405	387,6	368,6	361,5	361,8	359,75	365,4	359	363	354	355,8	355,2

4. Hasil Uji Kekerasan Setelah Perlakuan Panas

No	Nama Spesimen	Kekerasan (BHN)			Rata - rata (BHN)	Standar Deviasi
		1	2	3		
1	Failure Crossbar	405	405	405	405	0
2	H	598	604	602	601,34	3,05505
3	HT250t60	580	567	588	578,34	10,59874
4	HT300t60	560	566	563	563	3
5	HT350t60	530	521	527	526	4,582576
6	HT400t60	554	548	564	555,34	8,082904
7	HT250t120	578	571	572	573,67	3,785939
8	HT300t120	540	542	542	541,34	1,154701
9	HT350t120	495	501	498	498	3
10	HT400t120	510	512	508	510	2

5. Analisa Tegangan pada *Crossbar*





UCAPAN TERIMA KASIH

Pada pengerjaan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak, pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Allah SWT karena dengan rahmat dan kuasa-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini dengan baik dan tepat waktu.
2. Mama, Papa dan Kakak serta seluruh keluarga yang telah memberikan banyak doa, dukungan, semangat, cinta kasih, motivasi, dan inspirasi, serta dukungan dana dalam mengerjakan tugas akhir dan selama berkuliah di JTMM FTI-ITS.
3. Ir. Rochman Rochiem., M.Sc. dan Alvian Toto Wibisono ST., MT. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
4. Dr. Agung Purniawan, ST., M,Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
5. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
6. Dian Mughni Fellicia ST., M.Sc selaku dosen wali yang sangat mengayomi selama penulis menjalani pendidikan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.
7. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang telah membimbing penulis hingga terciptanya laporan ini.
8. Sahabat terbaik penulis yaitu Para Sayap yang beranggotakan Gentong, Aul, Dio, Dony, Gale, Daru, Ridho, Kemplo, Panji, Didit, Reggy, Ikiw, dan Yudha yang telah memberikan semangat dan energi positif selama penulis menjadi mahasiswa di JTMM FTI-ITS.
9. Gale dan Yudha yang telah menjadi *partner* TA terbaik selama mengerjakan tugas akhir ini.

10. Annisa Rizki yang telah memberi bantuan, dukungan moril, semangat, motivasi dan canda tawa serta cinta kasih kepada penulis dalam mengerjakan TA ini.
11. Destya, Danil, Dian dan teman – teman Alaska Surabaya yang telah memberi semangat dan dukungan.
12. Teman – teman bermain Dota yang telah menyita waktu saya mengerjakan TA.
13. Aslab korosi yang telah memberikan semangat dalam mengerjakan TA ini.
14. Teman-teman seperjuangan MT15 yang memberikan banyak cerita dalam kehidupan penulis.
15. Dan Seluruh pihak yang telah memberikan partisipasi dalam Tugas Akhir ini.
16. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Palembang pada tanggal 22 November 1995. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara pasangan Heri Suprianto dan Masda. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Xaverius 4 Palembang, SMP Negeri 1 Palembang, dan SMA Plus Negeri 17 Palembang. Setelah lulus dari jenjang SMA pada tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya.

Semasa kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan organisasi, pelatihan, dan seminar. Penulis pernah menjabat sebagai staff Departemen Hubungan Luar HMMT FTI-ITS 2014/2015 dan Wakil Kepala Departemen Hubungan Luar HMMT FTI-ITS 2015/2016. Selain itu penulis aktif sebagai Asisten Laboratorium Korosi dan Analisa Kegagalan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.

Penulis memiliki pengalaman kerja praktek di PT. Badak LNG pada bulan Juli-Agustus 2016. Selama kerja praktek penulis mendalami topik terkait “Analisis *Remaining Useful Life* Pipa *Firewater Train G* PT Badak LNG”.

Tugas akhir yang diambil penulis dalam bidang Korosi dan Analisa Kegagalan berjudul “Analisis Pengaruh Variasi Waktu Tahan dan Temperatur Tempering terhadap Sifat Kekerasan Material Crossbar yang Di Hardening sebagai Solusi Kegagalan pada Crossbar”.

Email: donyd.prasetya@gmail.com

(Halaman ini sengaja dikosongkan)